



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA.



FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS.

**“DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA DISPONIBLE DEL OLEAJE
Y SU VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL EN EL OCÉANO
PACÍFICO”.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN OCEANOLOGÍA.

PRESENTA:

TENOCH ISRAEL JUÁREZ DÍAZ.

ENSENADA B.C. MÉXICO, DICIEMBRE DEL 2011

Dedicatoria:

*A mi madre por todo el amor, apoyo y comprensión que siempre me ha
dado.*

RESUMEN.

“DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA DISPONIBLE DEL OLEAJE Y SU VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL EN EL OCÉANO PACÍFICO”.

El estado actual que presentan las energías fósiles ha creado la necesidad de utilizar fuentes de energía alternativas que puedan contribuir en gran medida con la demanda actual de energía que el mundo requiere. Usualmente cuando uno piensa en este tipo de energía viene a la mente la energía solar, eólica e hidráulica. Actualmente la energía proveniente del oleaje es un tipo de energía emergente y de las más prometedoras por su alta densidad energética y su vasta disponibilidad.

El objetivo del presente trabajo es determinar la potencia del oleaje disponible en el Océano Pacífico, con la finalidad de identificar los sitios con mayor disponibilidad de este recurso.

Mediante un conjunto de resultados de las características del oleaje obtenido a través del modelo numérico WAM ciclo 4.5 aplicado a la región del Océano Pacífico, se elaboró la climatología de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico para una simulación de 42 años. Los datos de oleaje que se utilizan incluyen información sobre: altura significativa del oleaje, período del oleaje y dirección de propagación.

Una de las características más notables de la potencia del oleaje es la variación zonal. Las olas más energéticas se presentan en latitudes altas, disminuyendo progresivamente en dirección hacia el Ecuador. La mayor riqueza energética se encuentra en el hemisferio sur, donde la variación estacional es menor que en el hemisferio norte. La climatología realizada muestra una variabilidad estacional y mensual en una resolución espacial regular de 1°.

Palabras clave: energía, potencia, oleaje y variabilidad.

**“DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA DISPONIBLE DEL OLEAJE Y SU
VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL EN EL OCÉANO PACÍFICO”.**

TESIS

QUE PRESENTA:

TENOCH ISRAEL JUÁREZ DÍAZ

APROBADA POR:



DR. FRANCISCO JAVIER OCAMPO TORRES

Presidente del Jurado



DR. JOSÉ PEDRO OSUNA CAÑEDO

Sinodal Propietario



DR. RAFAEL HERNÁNDEZ WALLS

Sinodal Propietario

AGRADECIMIENTOS.

A mi comité de tesis, Dr. Francisco Javier Ocampo, Dr. Pedro Osuna y Dr. Rafael Hernández, por el tiempo dedicado en leer, revisar y corregir este trabajo.

En especial al Dr. Francisco Javier Ocampo Torres por la confianza depositada para realizar este proyecto, por las facilidades obtenidas y el apoyo otorgado.

A los miembros del grupo de oleaje: Paco, Vlado, Héctor, Memo, Pedro, Barbas, Ixetl y Mony, por la amistad y el apoyo brindado en este tiempo de residencia en el CICESE, y algunos por leperazos.

A Ixetl por su colaboración en la validación del modelo numérico aquí desarrollado.

A los warapos de la Facultad de Ciencias Marinas, Ariel, Vladi, Salamanca, Moncho, Beto, Gordo Jr, Irmix, Fabs, Shey, Chepo, etc. Por compartir y formar parte de la aventura, por estar allí cuando los necesite y por todos los buenos momentos.

A mis hermanas Nancy y Araceli, a las nenas Sara y Mariana, a mi Abue Feliza, y a toda mi familia, porque siempre estuvieron allí, por el apoyo que siempre me ofrecieron y por creer en mí. Al Dr. Chino por ser una gran inspiración y un ejemplo a seguir.

Al Sol que me ilumina cada mañana, que me apoyo durante mucho tiempo, y me alienta a continuar.

Y con especial dedicación a mi madre por la confianza, por el apoyo moral, económico y emocional. Porque sin ti jamás lo hubiera logrado, Te amo.

CONTENIDO.

	Pagina
Dedicatoria.....	ii
Resumen.....	iii
Carta aprobatoria.....	iv
 CAPITULO I	
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	3
1.3 Objetivos.....	5
 CAPITULO II	
2.1 Origen del oleaje.....	6
2.2 Potencia del oleaje.....	8
2.3 Cálculo de la potencia del oleaje.....	8
2.3 Cálculo de la potencia en el oleaje irregular.....	15
 CAPITULO III	
3.1 Descripción del área de estudio.....	21
3.2 Metodología de trabajo.....	22
3.2.1 El modelo WAM ciclo 4.5.....	23
3.2.2 tratamiento de datos.....	23

CONTENIDO (Continuación).

3.2.3 Validación del modelo numérico.....	28
---	----

CAPITULO IV

4.1 Resultados de la validación del modelo numérico.....	31
--	----

4.2 Mapas de distribución de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico.....	32
---	----

CAPITULO V

5.1 Discusión.....	50
--------------------	----

5.2 Conclusión.....	56
---------------------	----

CAPITULO VI

6.0 Referencias bibliográficas.....	58
-------------------------------------	----

LISTA DE TABLAS.

Tabla I.- Áreas enmascaradas por WAM ciclo 4.5.....	9
Tabla II.- Mallas anidadas por WAM ciclo 4.5.....	9
Tabla III.- Localización de las estaciones virtuales (boyas).....	10
Tabla IV.- Validación de resultados del modelo WAM ciclo 4.5.....	18

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Onda senoidal pura.....	9
Figura 2. Esquema de un grupo de ondas.....	10
Figura 3. Columna de agua en una onda armónica.....	11
Figura 4. Definición de altura y período de las olas.....	16
Figura 5. Área de estudio.....	21
Figura 6. Localización geográfica de las boyas de NDBC-NOAA.....	30
Figura 7. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Enero.....	28
Figura 8. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Febrero.....	29
Figura 9. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Marzo.....	30
Figura 10. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Abril.....	31
Figura 11. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Mayo.....	32
Figura 12. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Junio.....	33
Figura 13. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Julio.....	34

LISTA DE FIGURAS (Continuación).

Figura 14. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Agosto.....	35
Figura 15. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Septiembre.....	36
Figura 16. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Octubre.....	37
Figura 17. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Noviembre.....	38
Figura 18. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Diciembre.....	39
Figura 19. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Abril-Septiembre....	41
Figura 20. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Octubre-Marzo.....	42
Figura 21. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Total.....	44
Figura 22. Potencia del oleaje en el Océano Pacífico: Litoral.....	45

*“La energía es la integral de la potencia en el tiempo,
eso significa que es importante tener cierta potencia,
pero más importante aún es tenerla durante un
período de tiempo largo.”*

Mats Leijo

Capítulo I.

INTRODUCCIÓN:

El oleaje ha atraído la atención y comentarios a lo largo de la historia grabada. Aristóteles (*circa* 300 AC) observó la existencia de una relación entre el viento y las olas, y la naturaleza de esta relación ha sido tema de estudio desde entonces. Sin embargo, en la actualidad, la comprensión del mecanismo de formación de las ondas y la forma en la que éstas viajan a través del océano no es de ninguna manera completa (The Open University, 1989).

En general las ondas en los océanos son generadas por diversos factores, entre los cuales se pueden señalar el viento, las fuerzas de atracción gravitacional que ejercen la Luna y el Sol, los sismos, etc. Sin embargo, de todos ellos, el viento constituye el agente que genera las ondas más comunes y de mayor densidad energética (cantidad de energía acumulada en un sistema por unidad de volumen) (McCormick, 1981). En particular, la forma más sobresaliente de la energía en el océano corresponde a las ondas superficiales generadas por el viento (oleaje).

En términos generales, el oleaje es simple energía en transmisión, es decir, la energía se transmite desde su origen hasta el lugar de su arribo (McCormick, 2007). Dado que tres cuartas partes de la superficie terrestre están cubiertas por mar, este recurso ofrece una fuente importante en el ámbito de las energías renovables.

El oleaje es una fuente de energía limpia y emergente. El Consejo Mundial de la Energía (WEC) en 2004 estimó que la potencia mundial en aguas profundas de este recurso es ~1-10 TW o 8000 a 80000 TWh/año (Panicker, 1976). Se estima que el total de la energía global que proporcionaría este recurso es del mismo orden de magnitud que el consumo de electricidad en el mundo.

Una estimación conservadora sugiere que es posible extraer un 10-25% de este recurso, lo que sugiere que la potencia de las olas podría hacer una contribución significativa de energía para cubrir la demanda actual de este recurso (Cruz, 2008). La mayor parte de esta energía se concentra en los Océanos Atlántico y Pacífico, en ambos hemisferios, particularmente entre las latitudes 40° y 60° observando valores de potencia por metro superiores a los 50 kW (Barstow, et al 2009).

La utilización del oleaje como una fuente de energía renovable es hoy en día una realidad, países como Estados Unidos, Canadá, Australia, China, Japón, España, Portugal, Noruega, Reino Unido y otros miembros de la Unión Europea, entre otros, ya cuentan con tecnología para la conversión de energía del oleaje en altamar y otros más invierten esfuerzos en el desarrollo de esta tecnología. Además, para el diseño y construcción de dispositivos convertidores de energía se necesitan estudios para evaluar el recurso en la zona de interés (Thorpe, 2004).

El total de la energía de una ola depende rigurosamente de 2 parámetros: la altura (H) y el período (T) de la ola, la potencia transmitida por una ola es

proporcional a H^2 y al T , y está expresado usualmente en kilowatts por metro de frente incidente de ola (kW/m) (Cruz, 2008).

La caracterización del oleaje puede ser obtenida a través de mediciones hechas por sensores de presión, boyas, barcos, satélites, etc. Sin embargo por el costo operativo y la falta de continuidad de estas mediciones, muchas veces no puede realizarse una completa caracterización del oleaje, por lo que la aplicación de un modelo numérico viene a solucionar en parte la problemática de la caracterización del oleaje.

En la actualidad son diversos los modelos numéricos del tipo denominado 3era generación, utilizados para simular las condiciones de oleaje, la mayoría de estos sistemas están basados en los modelos WAVEWATCHIII (Tolman, 2009) y WAM (Komen, et al 1994). El presente trabajo pretende realizar una evaluación de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico, a partir de resultados ya existentes de la utilización de un modelo numérico para simular el oleaje de forma histórica.

1.2 ANTECEDENTES:

En el presente trabajo se propone estimar la potencia del oleaje en el Océano Pacífico, a partir de resultados obtenidos con la implementación de un modelo matemático de tercera generación. Estudios para la estimación de la potencia del oleaje han sido realizados por: Duarte-Quiroga en 2004, Barstow *et al* en 2009 y Arinaga *et al* en 2011, entre otros más. Ya en referencia a dispositivos captadores de energía en la zona del Océano Pacífico se puede citar a Cerca-Martínez en 1995.

Cerca-Martínez (1995) realizó una evaluación de la energía del oleaje para la zona de Rosarito, Baja California, México. Mediante información de oleaje estimada para la zona de interés y utilizando las características de un aparato de conversión de energía del tipo Salter's Duck, encontró que el promedio de la energía es de 14.7 kW/m con una alta variabilidad, presentando un comportamiento marcadamente estacional con máximos en invierno.

Duarte-Quiroga (2004) utilizó el modelo WAM 4.0 para realizar una evaluación de la potencia del oleaje en la región de las islas en el Pacífico mexicano, encontrando rangos de potencia del oleaje que varían entre 5 y 20 kW/m.

La empresa privada Fugro OCEANOR SA, realizó un atlas de oleaje donde se incluyen mapas mundiales con la distribución de parámetros de oleaje como altura, periodo y dirección del oleaje, en base a resultados obtenidos con un modelo numérico de oleaje: WAM. A partir de esta información, Barstow *et al*

(2009), generan 3 mapas mundiales de distribución de la potencia del oleaje con una simulación numérica de 10 años.

Recientemente Arinaga *et al* (2011), publicaron la distribución de la potencia del oleaje en mapas globales, utilizando el modelo numérico WAVEWATCHIII hindcast en una simulación de 10 años, utilizando como parámetro inicial la H^2_{rms} , en la formulación de la potencia del oleaje.

El presente trabajo se centrara en la estimación de la potencia del oleaje y su distribución en el Océano Pacífico en base a resultados del modelo matemático WAM ciclo 4.5 aplicado a la región del Océano Pacífico, en una simulación histórica de 42 años.

1.3 OBJETIVOS:

Los objetivos principales de esta tesis se describen a continuación:

- Estimar la potencia del oleaje disponible en el Océano Pacífico.
- Analizar la variabilidad temporal y espacial de la potencia del oleaje.
- Identificar las zonas con mayor disponibilidad de la potencia del oleaje en el área de estudio.

Capítulo II.

2.1 EL ORIGEN DEL OLEAJE.

Como vimos en el capítulo anterior, las ondas en los océanos son generadas por diversos factores, siendo las ondas superficiales generadas por el viento las más comunes y de mayor densidad energética.

La energía de las olas se puede considerar como un derivado de la energía solar. Ya que parte de la radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra y concretamente sobre los océanos, calienta el aire produciendo desplazamientos horizontales de aire debidos a las diferencias de densidad. Debido a estos desplazamientos el viento por rozamiento con la superficie del océano genera el oleaje, transmitiendo a su vez, parte de su energía.

Es decir: Sol $\rightarrow$ Viento $\rightarrow$ Oleaje

Cuando el viento sopla sobre de la superficie del mar, las moléculas de aire interactúan con las moléculas de agua con las que están en contacto, dando lugar a una fuerza que se genera entre el aire y el agua, modificando la superficie del océano, generando inicialmente ondas muy cortas (*ripples*).

Estas ondas pueden crecer bajo la acción continua del viento, dejar el área de generación y propagarse libremente viajando miles de kilómetros con una pérdida de energía que depende de la pendiente del mismo oleaje (Ardhuin et al 2009). Las escalas de decaimiento de la energía del oleaje de pequeña amplitud son del orden de 20000 km.

La cantidad de energía que es transferida al agua y por lo tanto el tamaño de las olas resultante, dependerá de la velocidad del viento, la longitud de tiempo durante el cual sopla el viento y la distancia sobre la que éste sopla (el *fetch*) (Brooke, 2003). Teniendo siempre en cuenta que las olas no crecen indefinidamente aunque aumente el *fetch*, sino que la altura de las mismas alcanza un equilibrio.

Es decir, para una velocidad dada del viento, la energía de la ola puede estar limitada por el alcance o por la duración del mismo. En la que la energía que adquiere el océano se equilibra con la energía que se pierde (esto se hace básicamente por rompimiento de la cresta de la ola), obteniéndose lo que se conoce como un océano en completo desarrollo.

De acuerdo con todo lo anterior, se puede decir que la energía que posee el oleaje es un derivado terciario de la energía solar. En este sentido se podría concluir que la energía de las olas constituye una forma de almacenamiento de la energía solar en la superficie de los océanos, con una densidad relativamente alta (Cruz, 2008).

2.2 POTENCIA DEL OLAJE.

La potencia del oleaje, es en otras palabras la velocidad a la cual se transmite la energía del oleaje a través de la superficie del océano en un intervalo de tiempo. Por ello se describe inicialmente la naturaleza de las olas.

Las olas se mueven longitudinalmente con una velocidad de translación denominada celeridad (c). A su vez, las moléculas de agua se mueven en trayectorias elípticas o circulares, en función de la relación que existe entre la altura de la ola (H) y la profundidad del agua (h) donde se están moviendo.

En el caso más simple que se describe con la teoría lineal, el oleaje no representa un flujo de masa sino solamente un flujo de energía, desde su origen hasta su disipación en forma de rompiente. Esta energía es de dos tipos: Cinética y Potencial.

La formulación de la potencia del oleaje, se puede realizar utilizando dos técnicas del estudio del oleaje: Oleaje regular (Teoría lineal) y Oleaje irregular (Descripción espectral del oleaje), las cuales se describen a continuación.

2.3 CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL OLAJE REGULAR.

El oleaje se puede describir como un fenómeno regular que supone un movimiento periódico del fluido. En aguas profundas, las olas superficiales tienen una altura pequeña en comparación con su longitud de onda y su movimiento es aproximadamente senoidal (teoría lineal de ondas o de Airy). La teoría lineal resulta de la simplificación del análisis físico y matemático de la propagación del oleaje en un fluido.

Las olas se caracterizan por su longitud de onda, λ , altura, H , y el período, T (ver figura 1). La longitud de onda es la distancia entre dos crestas consecutivas;

la altura es la diferencia de la distancia vertical entre una cresta y un valle, y el período es el tiempo en segundos que tarda un valle o una cresta de la ola en recorrer su longitud de onda. La frecuencia f de la ola se define como el número de oscilaciones (cresta a cresta o valle a valle) de la superficie del mar por segundo (The Open University, 1989).

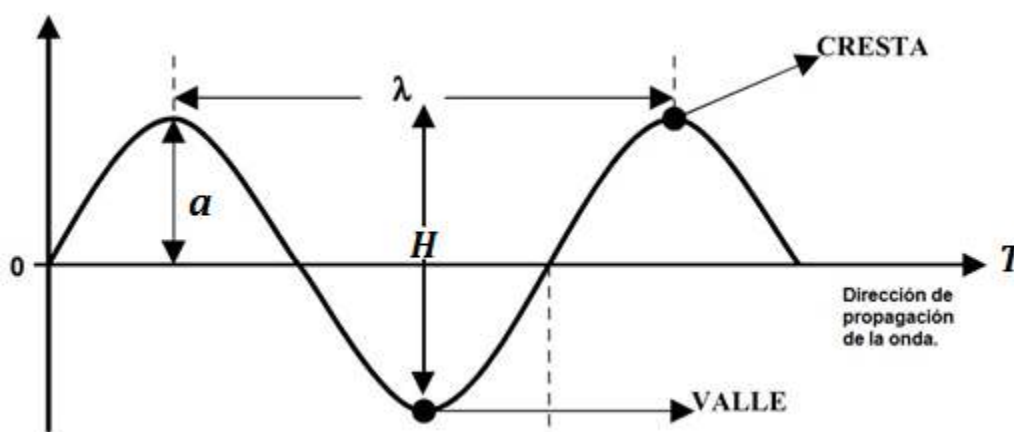


Figura 1. Esquema del perfil de una onda senoidal pura, donde a =amplitud de la onda, H =altura de la onda y T =período de la onda.

Según la teoría lineal, el oleaje queda descrito a partir de la caracterización de una onda individual (senoidal pura). Pero en general el océano no se compone de ondas senoidales puras, sino más bien son una superposición de muchas de ellas, por lo tanto, un estado típico del mar se compone de una superposición de ondas, cada onda con características propias, es decir, su propia velocidad, período, altura de onda y dirección.

Es la combinación de estas ondas lo que se observa cuando se mira la superficie del mar. Es decir que la superficie del mar puede ser reconstruida como la suma de dos o más ondas de amplitud variable.

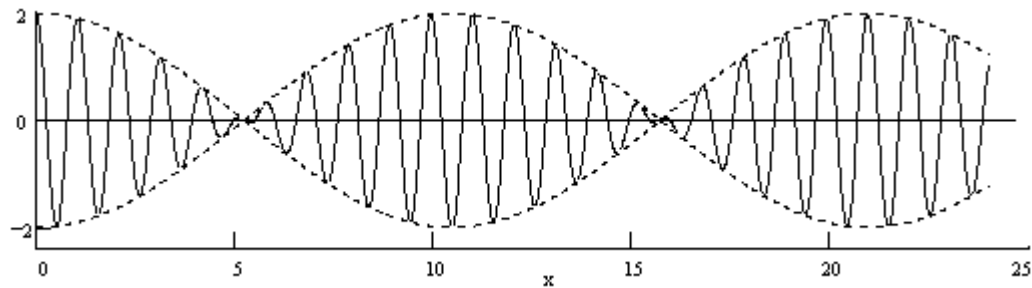


Figura 2. Esquema de la suma de 2 ondas.

La velocidad a la que viaja la envolvente de estas olas es lo que se conoce como la velocidad de grupo. Por lo tanto, se distinguen dos velocidades diferentes de avance de ondas: la velocidad de fase (C), correspondiente al avance de una ola individual; y la velocidad de grupo (C_g), correspondiente al avance del grupo (ver figura 2).

La presencia de una onda en la superficie del agua implica que las partículas del fluido se muevan de su posición a alguna otra posición. Estos cambios de posición requieren un trabajo realizado en contra de la gravedad, y ésto es lo que representa la energía potencial. Adicionalmente tenemos del movimiento de partículas de la onda, lo que representa la energía cinética (Holthuijsen 2007).

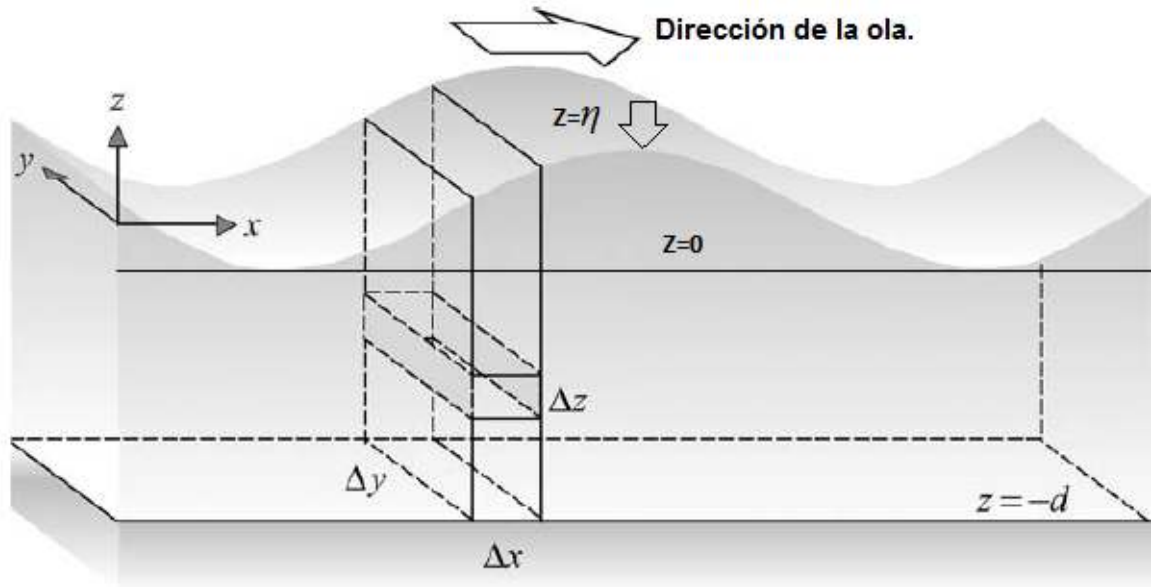


Figura 3. Columna de agua en una onda armónica, que se utiliza para derivar las ecuaciones de energía de la ola. Tomado de Holthuijsen 2007.

Para estimar la energía potencial, se considera un volumen de agua de espesor Δz en una columna con un área superficial horizontal $\Delta x \Delta y$. La energía potencial instantánea de este volumen de agua, relativa a $z=0$, es entonces $\rho g z \Delta x \Delta y$.

La energía potencial (E_p) correspondiente a una onda inducida en toda la columna de agua, desde el fondo ($-d$) hasta la superficie (η), es igual a la energía potencial en presencia de la onda, menos la energía potencial en ausencia de la misma ($z=0$) por unidad horizontal de área superficial en un período de tiempo promedio

$$E_p = \overline{\int_{-d}^{\eta} \rho g z \, dz} - \overline{\int_{-d}^0 \rho g z \, dz} = \overline{\int_0^{\eta} \rho g z \, dz} \quad (1.0)$$

donde la barra superior representa el promedio sobre un período de las olas. Para una onda armónica con amplitud (a), el resultado de la integral es:

$$Ep = \overline{\frac{1}{2} \rho g \eta^2} \quad (1.1).$$

La varianza de la elevación de la superficie del mar $\eta(t)$ es, por definición, el promedio del cuadrado de las elevaciones de la superficie (respecto a su media) $\overline{\eta^2}$ (la barra superior indica el promedio en el tiempo). Para una onda armónica de amplitud a , la varianza es $\overline{\eta^2} = \frac{1}{2} a^2$, por lo tanto:

$$Ep = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad (1.2).$$

La energía cinética (Ek) en la columna de agua, desde el fondo hasta la superficie, en el periodo promedio y por unidad de área superficial, está dada por:

$$Ek = \overline{\int_{-d}^{\eta} \frac{1}{2} \rho u^2 dz} \quad (1.3).$$

El resultado de esta integral para el caso de una onda armónica con amplitud (a) es:

$$Ek = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad (1.4)$$

De modo que, dentro de las aproximaciones de la teoría lineal tenemos que la energía potencial es igual a la energía cinética ($Ep=EK$), y la energía total (E_T)

inducida por una ola está definida por la suma de la energía potencial mas la energía cinética ($E_T = E_p + E_k$), es entonces la energía total inducida por una ola, por unidad de área horizontal en un tiempo promedio (Holthuijsen 2007):

$$E_T = \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad (1.5).$$

La ecuación anterior se puede expresar en términos de altura de ola (H), cambiando la amplitud a términos de altura al considerar que $a = H/2$, entonces obtenemos que:

$$E_T = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (1.6),$$

donde: ρ es la densidad del agua de mar (Kg m^{-3}), g es la gravedad (9.8 ms^{-2}), H es la altura de la ola (m) y la energía total (E_T) se expresa en *Jules* por metro cuadrado (J m^{-2}).

La transferencia de energía de las olas de un punto a otro punto en la dirección que viaja la ola es caracterizada por el flujo de energía o más comúnmente **potencia de la ola** (wave power) (McCormick 1981), definida por la siguiente ecuación:

$$P = (E_T) (C_g) \quad (1.7)$$

donde C_g es la velocidad de grupo del oleaje y está definida como: $C_g = 1/2 C$, donde C es la Celeridad de la ola, que se puede expresar como: $C = (g \cdot T) / 2\pi$.

Rescribiendo la ecuación anterior tenemos que la potencia del oleaje es:

$$P = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \left(g \frac{T}{4\pi} \right) \quad (1.8)$$

Que se expresa comúnmente en Watts (W). Realizando una simplificación de la ecuación anterior tenemos que:

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \left(\frac{w}{m} \right) \quad (1.9)$$

donde T es el período de la ola expresado en segundos. Es decir, el potencial medio de energía de una ola individual idealizada (onda senoidal de amplitud constante y periodo y longitud de onda bien definidos), varía con el cuadrado de la altura de ola (H) y con el periodo de la misma (T).

2.4 CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL OLAJE IRREGULAR.

En realidad, el oleaje es un fenómeno complejo y aleatorio, tanto en el espacio como en el tiempo. El oleaje real es una superposición de trenes de olas con diferentes valores de periodo y altura que dan como resultado registros complejos de la superficie libre.

El oleaje real se estudia principalmente con dos técnicas distintas: mediante una descripción estadística de los parámetros o bien mediante el uso de una función de densidad espectral, siendo ésta última la más adecuada para el presente trabajo.

La descripción Geométrica-estadística.

La primera consiste en la extracción de parámetros característicos del oleaje a partir de series de tiempo de la superficie libre. A partir de dichos registros, se toma el criterio de paso por cero ascendente (o descendente) para considerar cada ola por separado con una altura y período asociados (ver fig. 4).

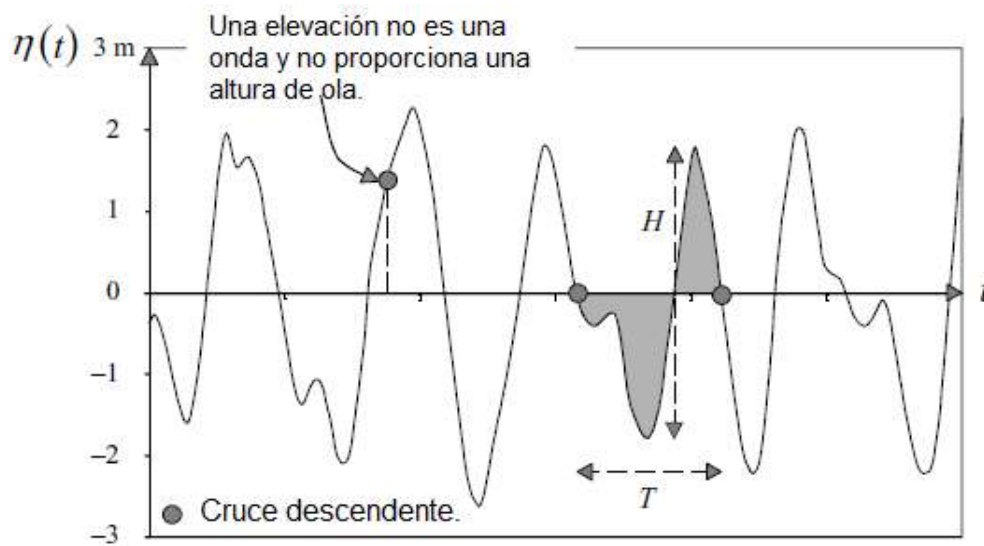


Figura 4. Definición de la altura y período de las olas en un registro de tiempo de la elevación de la superficie. Tomado de Holthuijsen (2007).

Si partimos de un ejemplo de registro de oleaje de tiempo limitado, se obtienen N alturas de ola H_i con T_i periodos asociados. Cada altura H_i será la máxima variación de la superficie libre entre dos pasos por cero ascendentes y T_i el tiempo transcurrido entre dichos puntos.

Una vez que se tienen estos datos, el oleaje estará caracterizado por un solo valor de altura de ola y período que defina el estado de mar. Los principales estadísticos que se utilizarán para este estudio son los siguientes:

- Altura de la ola

—Altura significativa del oleaje (H_s o $H1/3$): Media aritmética de la altura del tercio de olas más altas del conjunto de las N olas en un registro dado.

—Altura de ola $H1/10$: Media aritmética de la décima parte de la altura de olas más altas. Es menos frecuente en el uso estadístico que la anterior.

—Altura de ola cuadrática (H_{rms}): Media cuadrática del registro de alturas de ola. Se calcula como $H_{rms}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N H_i^2}{N}$ y proporciona una idea de la energía contenida en el registro del oleaje.

—Altura máxima de ola (H_{MAX}): Máxima altura de ola de un conjunto de N olas.

- Período

—Período medio (T_z): Período promedio de los pasos por cero ascendentes o descendientes.

—Período significativo ($T1/3$): Media aritmética de los períodos asociados al tercio del registro con las olas más altas.

Según la función de densidad espectral.

En este caso se considera al oleaje como una señal compleja (al igual que otros fenómenos como el ruido) que puede caracterizarse mediante su espectro de energía o función de densidad espectral. Para un estado de mar determinado,

la función de densidad espectral describe la distribución de su energía en cada intervalo de frecuencias angulares y de direcciones.

Concretamente, en función del dominio en que se trabaje, se tiene:

Función de densidad espectral escalar $S(w)$ de la superficie libre del mar: representa la energía total del oleaje, promediada en el tiempo, existente en cada intervalo de frecuencia Δw . Se obtiene a partir del registro y análisis de un solo parámetro.

Función de densidad espectral direccional $S(w,\theta)$ de la superficie libre del mar: representa la energía total del oleaje promediada en el tiempo, existente en cada intervalo de frecuencia.

Una representación del espectro, aparte de permitir ver como se distribuye la energía, representa los tipos de oleaje existentes (*SEA* o *SWELL*), así como los valores pico de periodo como el inverso de la frecuencia pico. Si se ha podido determinar el espectro que corresponde a un estado de mar, es posible obtener a partir de momentos espectrales (m_i) las alturas de ola y periodos. Se define el momento espectral de orden i como:

$$m_{(i)} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \omega^i S(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad (2.0)$$

donde: $S(\omega, \theta)$ función de densidad espectral; ω i , frecuencia i -ésima; θ dirección (Hidalgo-Olea, 2009).

Para el cálculo de la potencia del oleaje, se parte de la energía total contenida en éste, la cual se define, como ya se menciono anteriormente en este capitulo, mediante la función de densidad espectral.

La energía media total por unidad de área, de dicho estado de mar, se obtiene integrando la función de densidad espectral escalar en todo el dominio de frecuencias:

$$\bar{E} = \rho g \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (2.1)$$

Como ya se menciono anteriormente la expresión de la celeridad de grupo para el dominio de aguas profundas es: $Cg = g^*T/4\pi$

Entonces, por definición, la potencia del oleaje de un estado de mar queda expresado de la forma:

$$\bar{P} = \bar{E} Cg = \rho g \int_0^{\infty} S(\omega) Cg d\omega = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{S(\omega)}{\omega} d\omega \quad (2.2)$$

Para resolver la ecuación anterior se debe recurrir a la definición de parámetros del periodo energético (T_e) y altura significativa de la ola (H_{mo}) mediante los momentos espectrales.

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad y \quad H_{mo}^2 = (4.04\sqrt{m_0})^2 \cong 16m_0 = 16 \int_0^{\infty} S(w)dw$$

por lo que sustituyendo estos parámetros en la ecuación 2.2 y resolviendo obtenemos:

$$\bar{P} = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^\infty \frac{S(\omega)}{\omega} d\omega = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_{m0}^2 \quad (2.3)$$

La altura de ola significativa se puede estimar mediante el coeficiente de proporción tomado de la distribución de Rayleigh que es $H_{m0}=4.04\sqrt{m_0}=H_s$ donde m_0 es el momento espectral de orden 0. Para fines del presente trabajo, $H_s=4\sqrt{m_0}$ por lo que la potencia del oleaje está dada por la siguiente expresión:

$$\bar{P} = \frac{\rho g^2 H_s^2 T_e}{64\pi} \quad (2.4)$$

esta expresión funciona para un mar con alturas y períodos al azar, por unidad de longitud de cresta de ola (Cruz, 2008). Esta será la formula que se utilizará en el presente trabajo.

Capítulo III.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO:

Como parte de las actividades del proyecto CONACYT-CENER S001-2009-01 el modelo numérico se aplicó a una malla computacional que cubre el siguiente dominio geográfico: -72° a 68° en latitud y -240° a -60° en longitud, con una resolución espacial regular de 1 grado, ubicando el área de estudio en el Océano Pacífico, donde se centra el interés del estudio por la influencia que genera su variada climatología en la generación del oleaje.

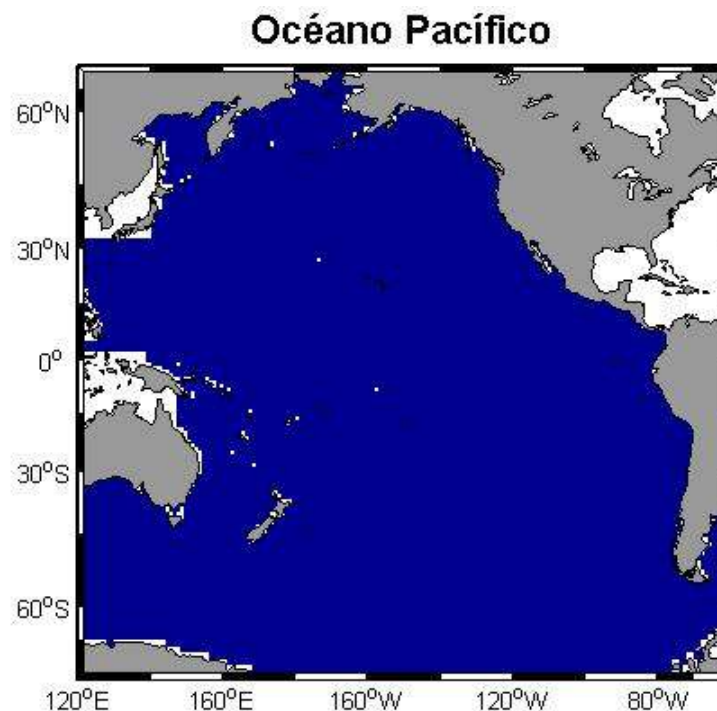


Figura 5. Área de estudio: Dominio numérico en el Océano Pacífico. Los espacios en color blanco representan áreas enmascaradas por el modelo numérico.

3.2 METODOLOGÍA:

Para fines prácticos la metodología en este trabajo se ha dividido de la siguiente manera:

- I. Modo de implementación del modelo numérico WAM ciclo 4.5 en el área de estudio.
- II. Tratamiento de parámetros de oleaje obtenidos de la base de datos del modelo WAM ciclo 4.5. y generación de mapas de la distribución del recurso energético disponible del oleaje en el Océano Pacífico.
- III. Validación del modelo numérico WAM ciclo 4.5.

Para obtener mapas de distribución del recurso energético del oleaje en el Océano Pacífico, primeramente se recopiló archivos, los cuales contenían almacenados parámetros de oleaje, que se obtuvieron a partir de la aplicación del modelo WAM ciclo 4.5 al Océano Pacífico. Una explicación detallada se presenta en el reporte técnico del Dr. Pedro Osuna, en el proyecto CONACYT-CENER S0019-2009-01.

Aquí se describe brevemente las características y funcionamiento del mismo modelo, para posteriormente realizar el tratamiento de los datos recopilados.

3.2.1 Modelo WAM ciclo 4.5

El modelo WAM es un modelo de tercera generación para la predicción del espectro direccional del oleaje, que resuelve la ecuación de balance de energía explícitamente.

El modelo se puede ejecutar en cualquier red regional o mundial dado un conjunto de datos topográficos prescritos. La resolución de cuadrícula puede ser arbitraria en espacio y tiempo. La propagación puede hacerse latitudinal-longitudinal o en una cuadrícula cartesiana. El modelo regresa datos de: la altura representativa de ola, dirección de onda media y frecuencia absoluta, la altura del *swell* y dirección media, campos de estrés de viento corregidos por el estrés inducido por la ola y el coeficiente de arrastre en cada punto de la cuadrícula en tiempos de salida, y también el espectro direccional del oleaje en puntos de cuadrícula y tiempos de salida.

A) Intervalos de integración y período de simulación.

El modelo WAM posee dos pasos temporales de integración; uno correspondiente a la advección de energía y otro correspondiente a la integración de los términos fuente. En esta implementación, ambos pasos en tiempo son definidos como 20 minutos. La simulación numérica comprende un período de 42 años, entre enero de 1968 y diciembre de 2009.

B) Batimetría.

La batimetría utilizada fue extraída de la base ETOPO2v2, cuya resolución espacial es de 2 minutos en latitud y longitud. Los datos extraídos abarcan la región entre -80° y 80° en latitud y -260° y -60° en longitud, con una resolución igual a la original. Para la presente implementación, los detalles batimétricos no son considerados para la propagación del oleaje y ésta se considera como en aguas profundas en todo el dominio (es decir, no se considera refracción por el fondo). La batimetría sólo se utiliza para definir los márgenes divisorios entre mar y tierra.

Fuente de los datos de batimetría:

<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html>

C) Viento.

El forzamiento atmosférico está representado por las componentes del viento a 10 metros sobre el nivel del mar, extraídos de la base de datos de superficie de Re-análisis NCEP/NCAR.

La resolución temporal original de la base de datos es de 6 horas, con una resolución espacial variable en latitud, la cual fue interpolada a una malla con resolución espacial regular de 1 grado. Se prepararon los datos correspondientes al período 1968–2009 para ser usados como forzamiento en el modelo numérico de oleaje.

Fuente de los datos de viento:

ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/ncp.reanalysis/surface_gauss/

D) Resolución espectral.

En esta implementación, el espectro direccional está discretizado de la siguiente manera:

40 frecuencias: desde 0.026Hz hasta 1.07Hz, con una distribución logarítmica, y 36 direcciones, lo cual representa una resolución direccional de 10 grados.

E) Dominio numérico.

La malla numérica cubre el siguiente dominio geográfico: -72° a 68° en latitud y -240° a -60° en longitud, con una resolución espacial regular de 1° . Esta región contiene áreas consideradas como de efecto nulo en la generación del oleaje incidente en el Pacífico mexicano, por lo cual se decidió enmascararlas (es decir, se definen como tierra). Las áreas enmascaradas son:

Tabla 1. Áreas enmascaradas en WAM ciclo 4.5.

Área	Latitud (grados)	Longitud (grados) de 0 a 360°
Bahía Hudson y Golfo de México.	18 a 68	262 a 300
Mar Caribe (01).	14 a 18	271 a 300
Mar Caribe (02).	08 a 14	276 a 300
Mar de Arafura (Norte de Australia).	-20 a -07	120 a 146
Oeste de Nueva Guinea.	-07 a 01	120 a 138
Mindanao.	05 a 12	120 a 125
Sur del Mar de Japón.	32 a 39	120 a 139
Norte del Mar de Japón.	39 a 52	120 a 142

F) Mallas anidadas.

La implementación en el Océano Pacífico es del tipo de malla gruesa, es decir que no se definen condiciones de frontera como forzamiento para este dominio. Como resultados, se definen dos áreas para las cuales se generaran condiciones de frontera (mallas anidadas):

Tabla 2. Mallas anidadas en WAM ciclo 4.5.

Dominio	Latitud (grados)	Longitud (grados)
Nest 1	00 a 34	-119 a -77
Nest 2	22 a 34	-119 a -105

3.2.2 Tratamiento de parámetros de oleaje obtenidos de la base de datos del modelo WAM ciclo 4.5.

Los mapas de distribución del potencial de energía del oleaje fueron realizados de la siguiente manera:

Como resultado de la simulación del modelo WAM ciclo 4.5 se obtuvieron datos diarios de parámetros integrales previamente definidos, almacenados en archivos con nombre MAPYYYYMMDDHHMNSS, donde YYYY indica el año, MM indica el mes, DD indica el día, HH indica la hora, MN indica el minuto y SS indica el segundo. Los mapas fueron almacenados con una periodicidad horaria.

Los parámetros almacenados de oleaje son:

Velocidad del viento (U10), dirección del viento, velocidad de fricción, altura significativa de la ola, período pico de la ola, período promedio de la ola, dirección del oleaje, dirección del swell, dirección del sea, etc.

Primeramente se realizo una subrutina de MATLAB que recopilara todos los archivos que el modelo WAM ciclo 4.5 género como resultado de la simulación histórica de 42 años, teniendo en cuenta que los archivos fueron almacenados diariamente, divididos en carpetas mensuales para cada uno de los 42 años de la simulación.

Una vez recopilados estos archivos se procedió a extraer los parámetros de oleaje necesarios para realizar el cálculo de la potencia media del oleaje.

Obtenidos los valores de la altura significativa (H_s) y período promedio (T_m) del modelo WAM ciclo 4.5, se realizo el cálculo de $(H_s^2)(T_m)$, para cada punto de la malla computada, es decir se obtuvo un solo valor de los parámetros del oleaje, para cada punto de la malla computada en cada tiempo de la simulación, donde posteriormente se obtuvieron promedios de este valor, en series de tiempo mensuales, estacionales y un valor anual. Estos valores fueron guardados en un archivo .MAT.

Posteriormente en otra subrutina de MATLAB los valores promedios fueron ingresados en la fórmula 2.4 sustituyendo los valores correspondientes, para obtener la potencia disponible del oleaje, en cada punto de la malla computada, en cada tiempo de la simulación. Para posteriormente ser graficados en mapas de distribución.

3.2.3 La validación del modelo numérico.

Los datos registrados por boyas de la NOAA-NDBC representan datos obtenidos *insitu*, catalogados como de alta calidad, en series largas de tiempo, y pueden ser utilizadas para realizar validaciones de datos de modelos numéricos de oleaje, en función de la altura significativa y el período.

La validación del modelo se realizó comparando una serie de tiempo de altura significativa de ola (H_s) resultante del modelo WAM ciclo 4.5, con series de tiempo de las H_s de 9 boyas de la NDBC (ver tabla 3 y fig. 2) ubicadas en el norte del Océano Pacífico.

Se comparó la H_s de cada boya en su posición indicada, con la H_s del modelo en la posición de la boya correspondiente, en una serie de tiempo dada por la boya. A partir de esta comparación de datos, se realizó una regresión lineal y se calculó el coeficiente de correlación (R) correspondiente.

Tabla 3. Localización de las estaciones virtuales (boyas).

Boya	Latitud (grados)	Longitud (grados)	ID mapa	Período
46001	56.30 N	148.02 W	1	1972-2009
46002	42.58 N	130.47 W	2	1975-2009
46005	46.10 N	131.00 W	3	1976-2009
46006	40.75 N	137.46 W	4	1977-2009
46026	37.75 N	122.84 W	5	1982-2009
46047	32.43 N	119.84 W	6	1991-2009

46053	34.24 N	119.84 W	7	1994-2009
46059	38.047 N	129.96 W	8	1994-2009
51004	17.59 N	152.38 W	9	1976-2009

La tabla 3 muestra la posición geográfica de cada boya, así como el período de tiempo en que ésta ha operado funcionalmente.

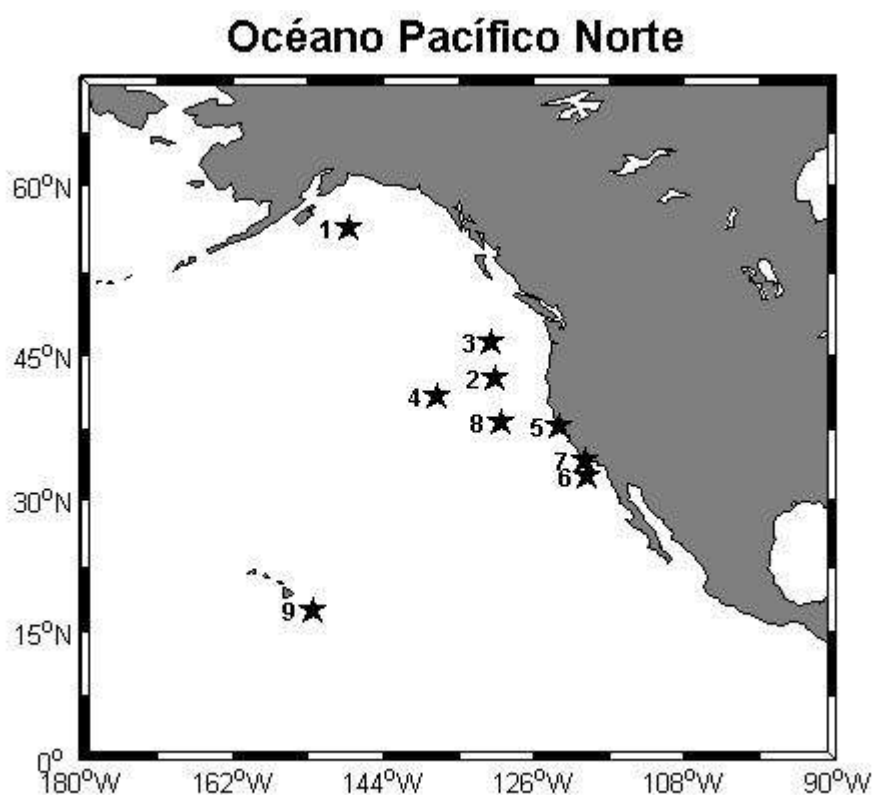


Figura 6. Localización geográfica de las boyas de NDBC-NOAA utilizadas en la validación del modelo WAM ciclo 4.5.

Capítulo IV.

4.1 RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.

A partir de la comparación de los datos registrados por 9 boyas de la NDBC con los datos de salida obtenidos por el modelo WAM ciclo 4.5 se calculo el nivel de concordancia (coeficiente de correlación) mostrado en la tabla 4.

Tabla 4. Validación de resultados del modelo WAM ciclo 4.5

Boya	Posición	R	# Datos
46001	56.30N 148.6W	0.7958	333120
46002	42.58N 130.47W	0.8218	306816
46005	46.10N 131.0W	0.8312	298056
46006	40.75N 137.46W	0.8509	289272
46026	37.75N 122.83W	0.6578	245448
46047	32.40N 119.53W	0.7103	166560
46053	34.24N 119.84W	0.6353	140256
46059	38.04N 129.96W	0.8053	140256
51004	17.52N 152.38W	0.7281	298056

La tabla 4 muestra el número de boya, la posición, el número de datos obtenidos, y el coeficiente de correlación R.

Donde R indica el grado de asociación entre dos variables, cuando $R \approx 1$ indica una dependencia total entre las dos variables, es decir que la H_s del modelo y la H_s registrada por la boya son similares, y cuando $R \approx 0$ no existe una relación lineal, es decir que los resultados del modelo numérico no son similares a lo registrado por las boyas de la NDBC.

El resultado de la R mostrada en la tabla 4, indica que en promedio el 80% de los datos del modelo numérico están relacionados linealmente con los datos proporcionados por las boyas, por lo que para fines del presente trabajo se considera que el modelo simula correctamente la altura y período del oleaje.

4.2 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA POTENCIA DEL OLEAJE.

4.2.1 Promedios mensuales de la Potencia del Oleaje en el Océano Pacífico.

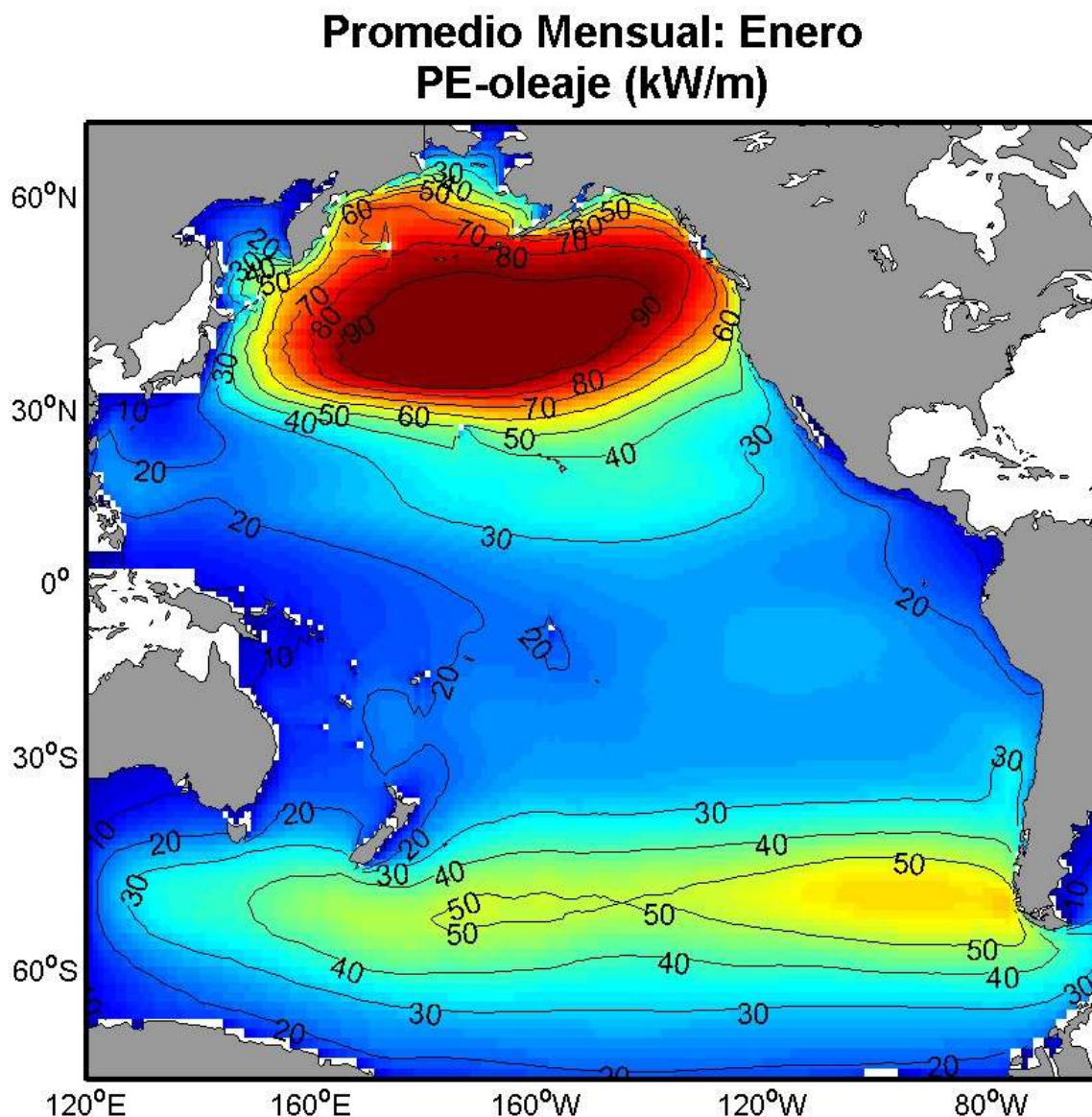


Figura 7. Promedio de la potencia del oleaje (PE-Oleaje) en el Océano Pacífico estimado en kW/m para el mes de enero, en un período de simulación de 42 años.

Promedio Mensual: Febrero
PE-oleaje (kW/m)

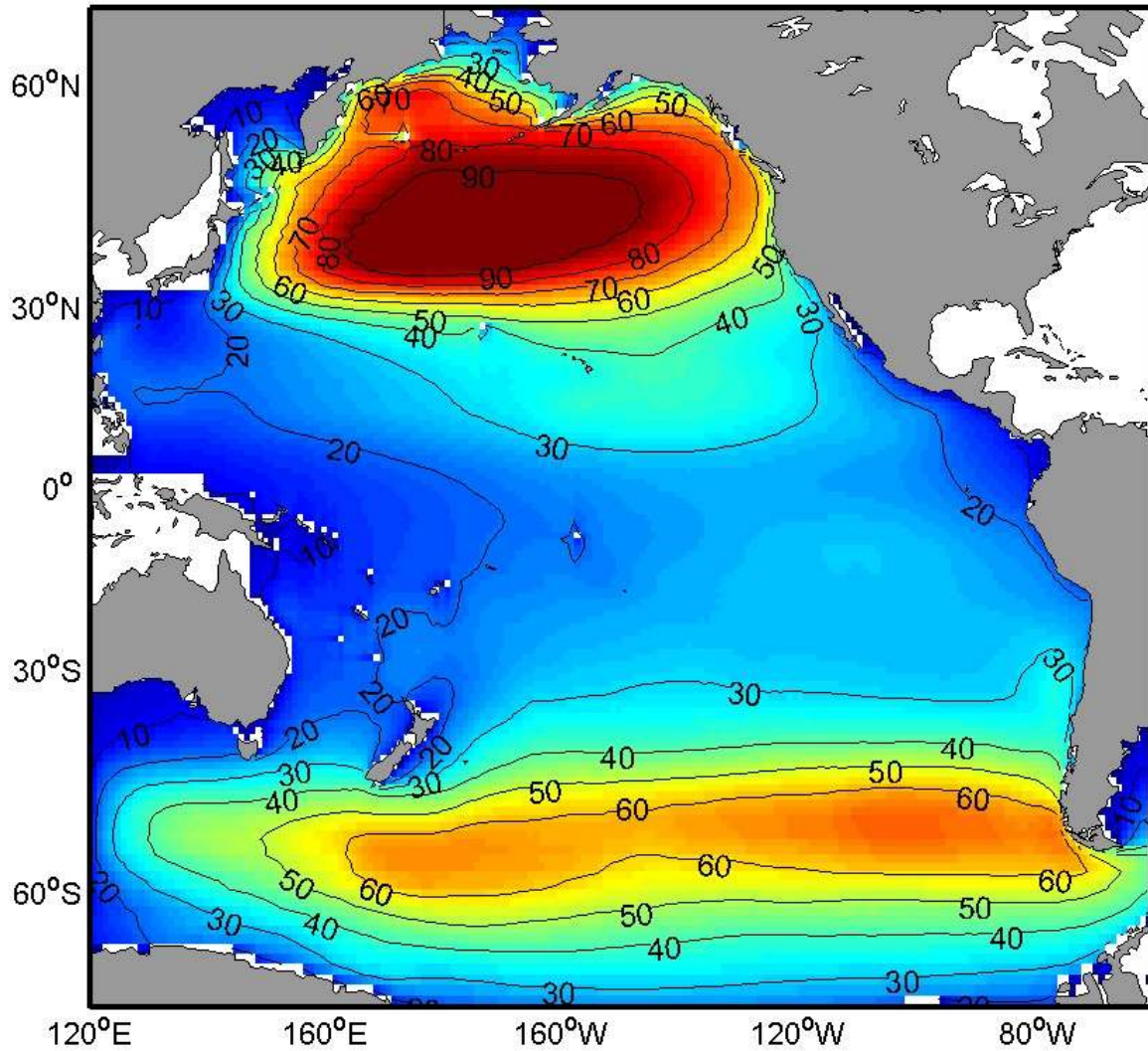


Figura 8. Promedio de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico estimado en kW/m para el mes de febrero en un período de 42 años.

Promedio Mensual: Marzo PE-oleaje (kW/m)

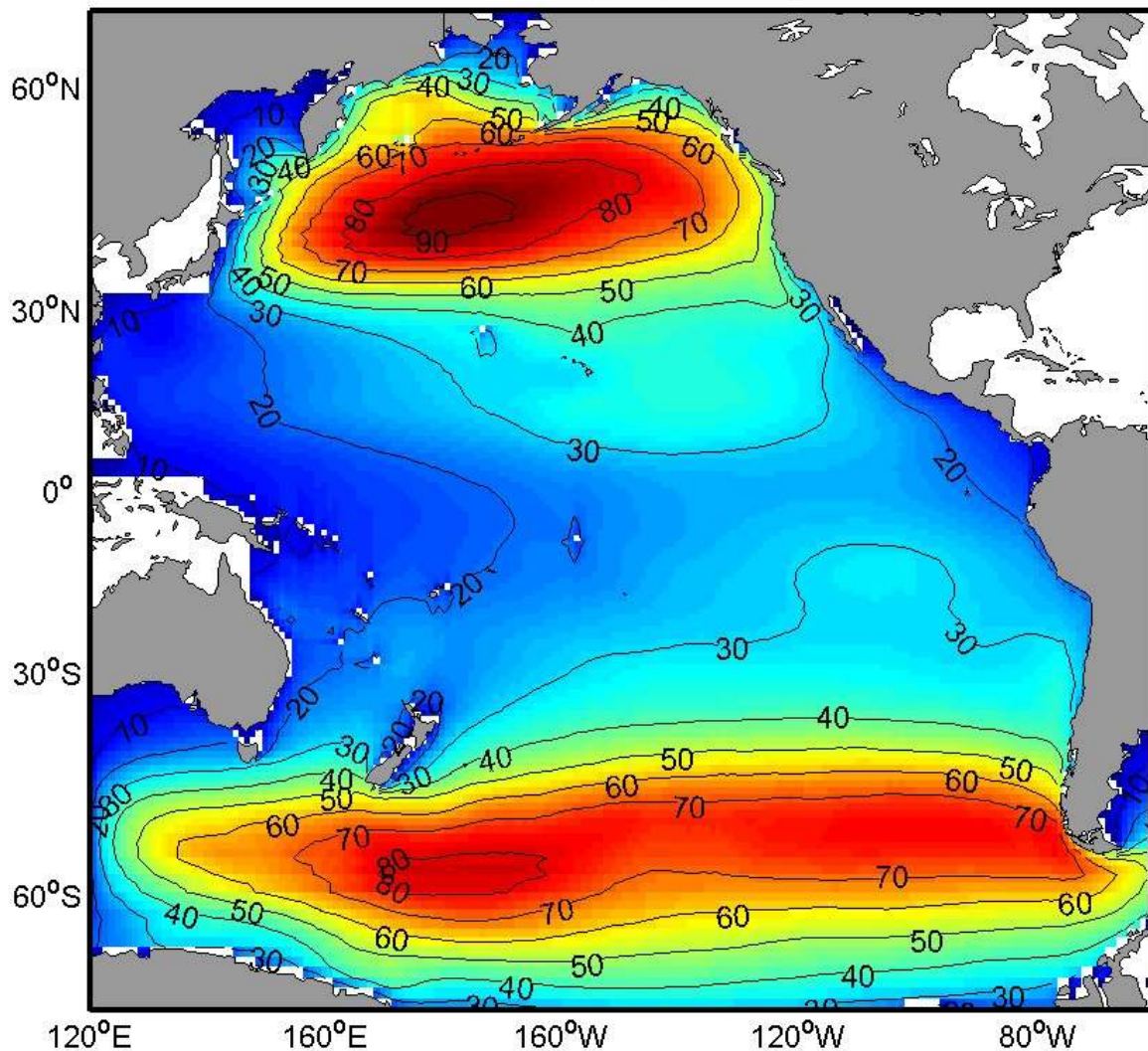


Figura 9. Promedio de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico estimado en kW/m para el mes de marzo en un período de 42 años.

En la(s) figura(s) 7, 8, y 9, se observan niveles máximos de la potencia del oleaje en el hemisferio norte, generado por las tormentas de la temporada invernal, con valores superiores a los 90 kW/m.

Promedio Mensual: Abril PE-oleaje (kW/m)

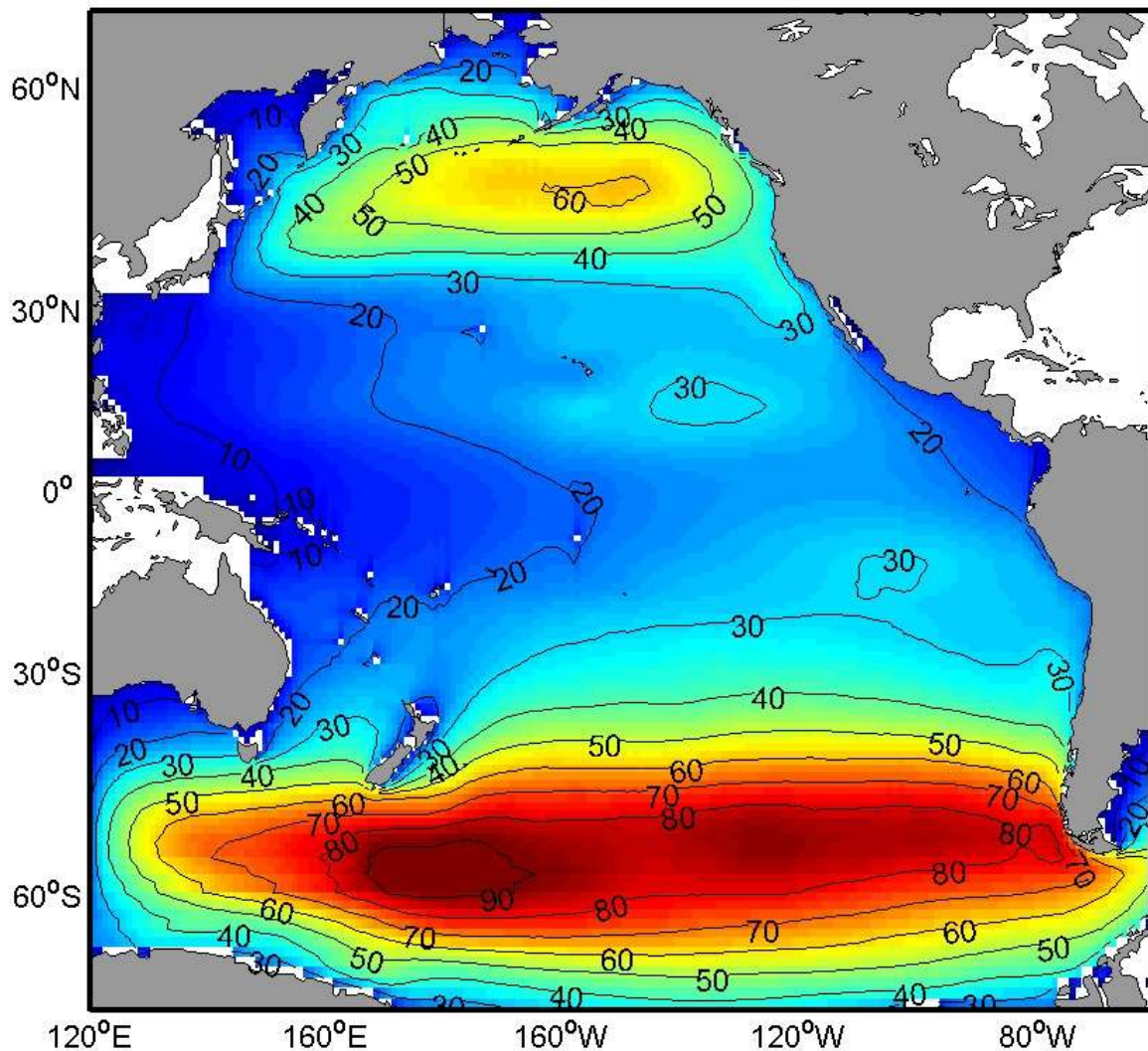


Figura 10. Promedio de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico estimado en kW/m para el mes de abril en un período de 42 años.

Los espacios en blanco son el resultado de las áreas enmascaradas por el modelo WAM ciclo 4.5, tomando en cuenta estos espacios en blanco como tierra firme.

Promedio Mensual: Mayo PE-oleaje (kW/m)

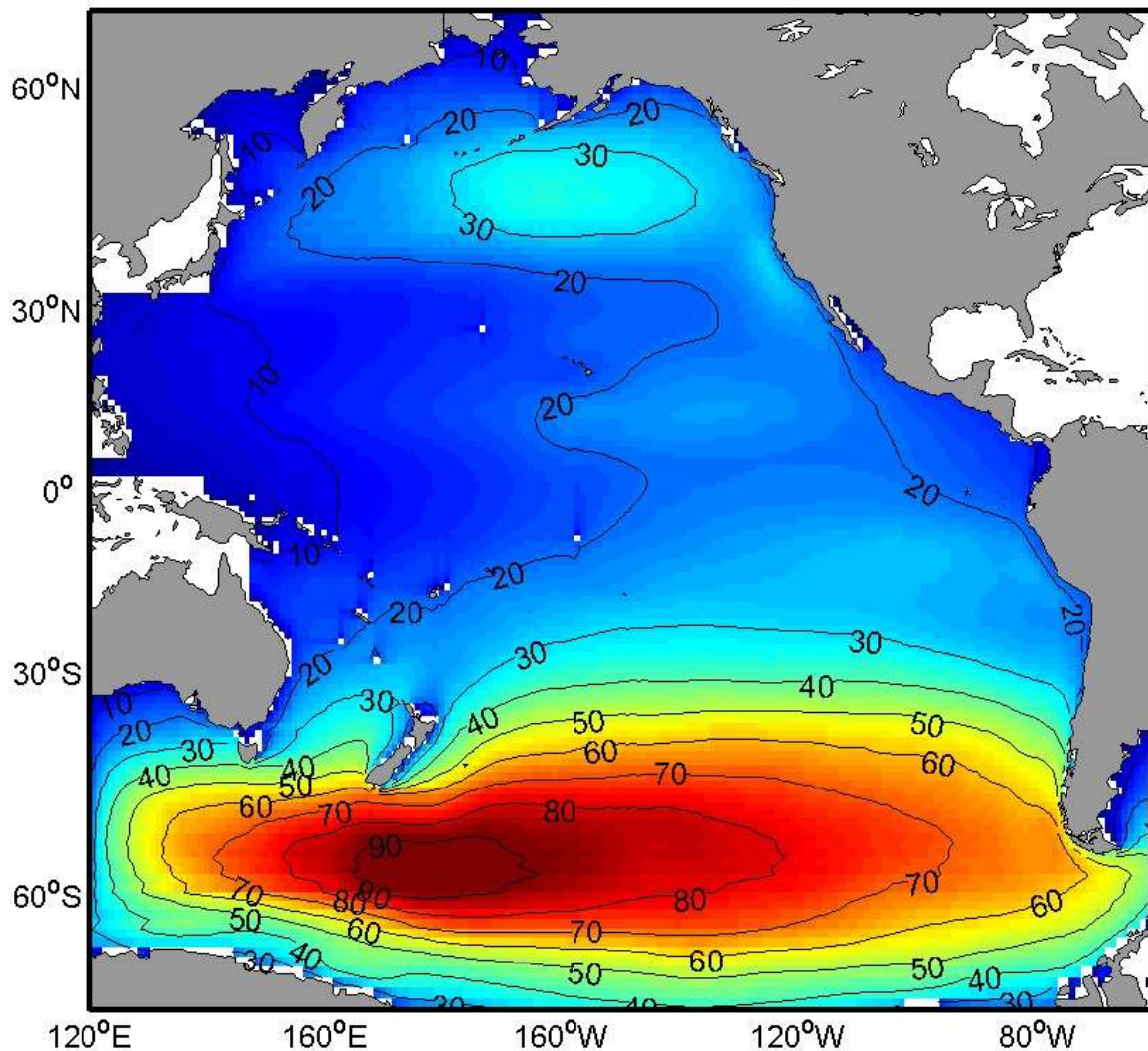


Figura 11. Promedio de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico estimado en kW/m para el mes de mayo en un período de 42 años.

En las figuras 10 y 11 se puede observar claramente una disminución en la potencia del oleaje en el Hemisferio norte, a medida que el invierno se aleja y el verano se aproxima, con condiciones climáticas de calma y escasas tormentas.

Promedio Mensual: Junio PE-oleaje (kW/m)

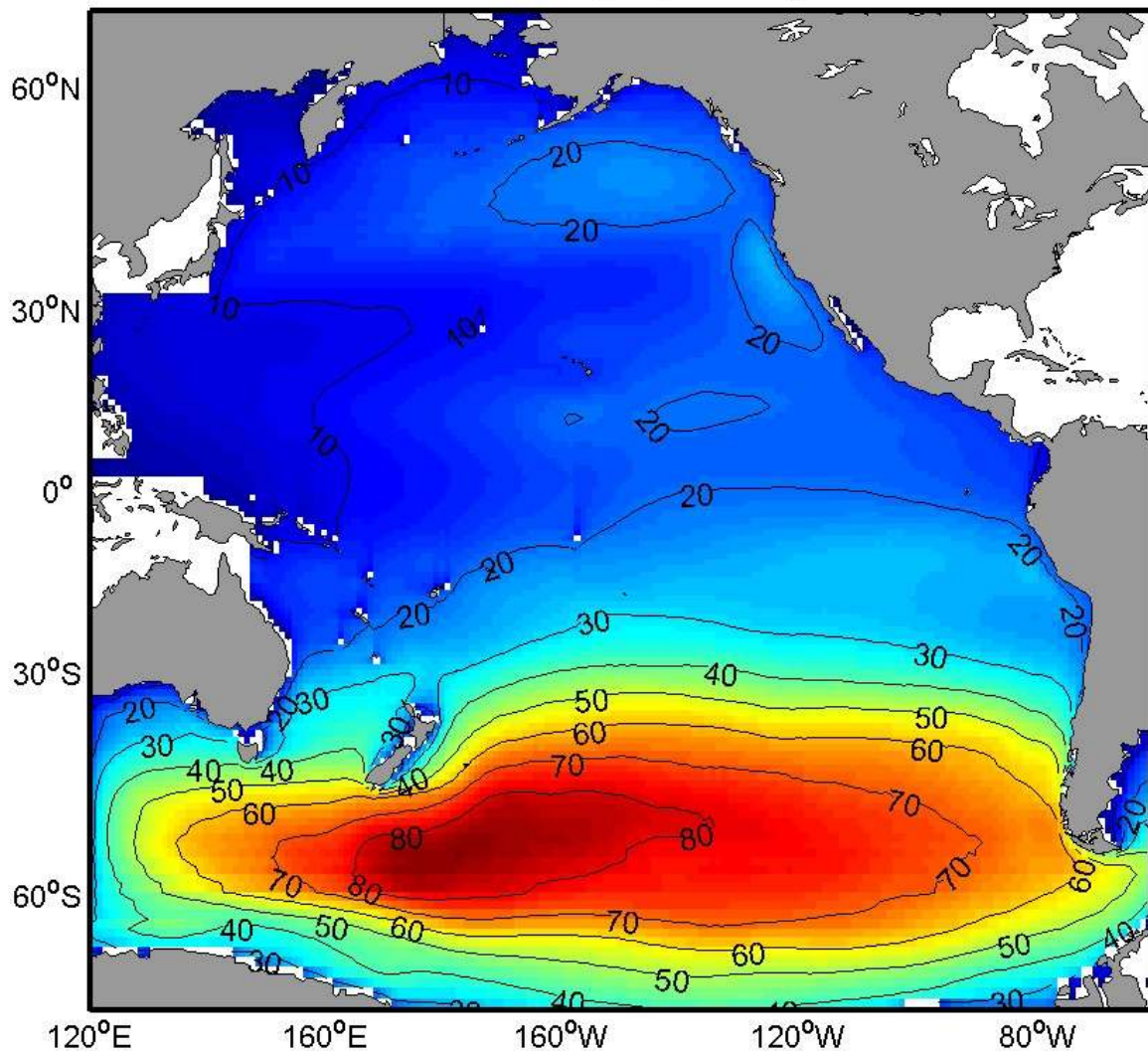


Figura 12. Promedio de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico estimado en kW/m para el mes de Junio en un período de 42 años.

En las figuras 10, 11 y 12 se puede observar como la potencia del oleaje comienza a aumentar progresivamente en el hemisferio sur con la entrada de la temporada invernal, al generarse tormentas más fuertes y cada vez más frecuentes.

Promedio Mensual: Julio
PE-oleaje (kW/m)

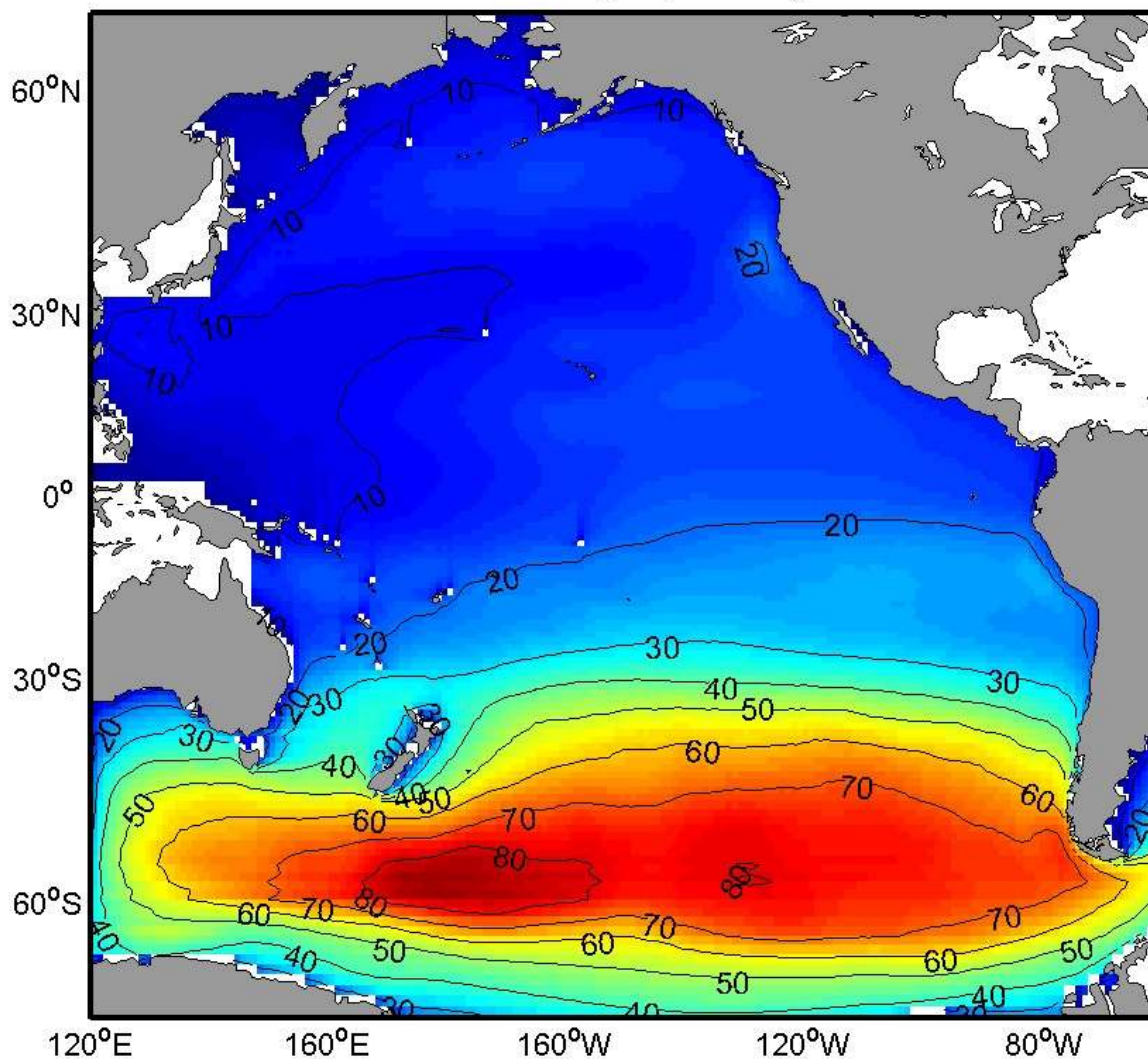


Figura 13. Promedio de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico estimado en kW/m para el mes de Julio en un período de 42 años.

Promedio Mensual: Agosto PE-oleaje (kW/m)

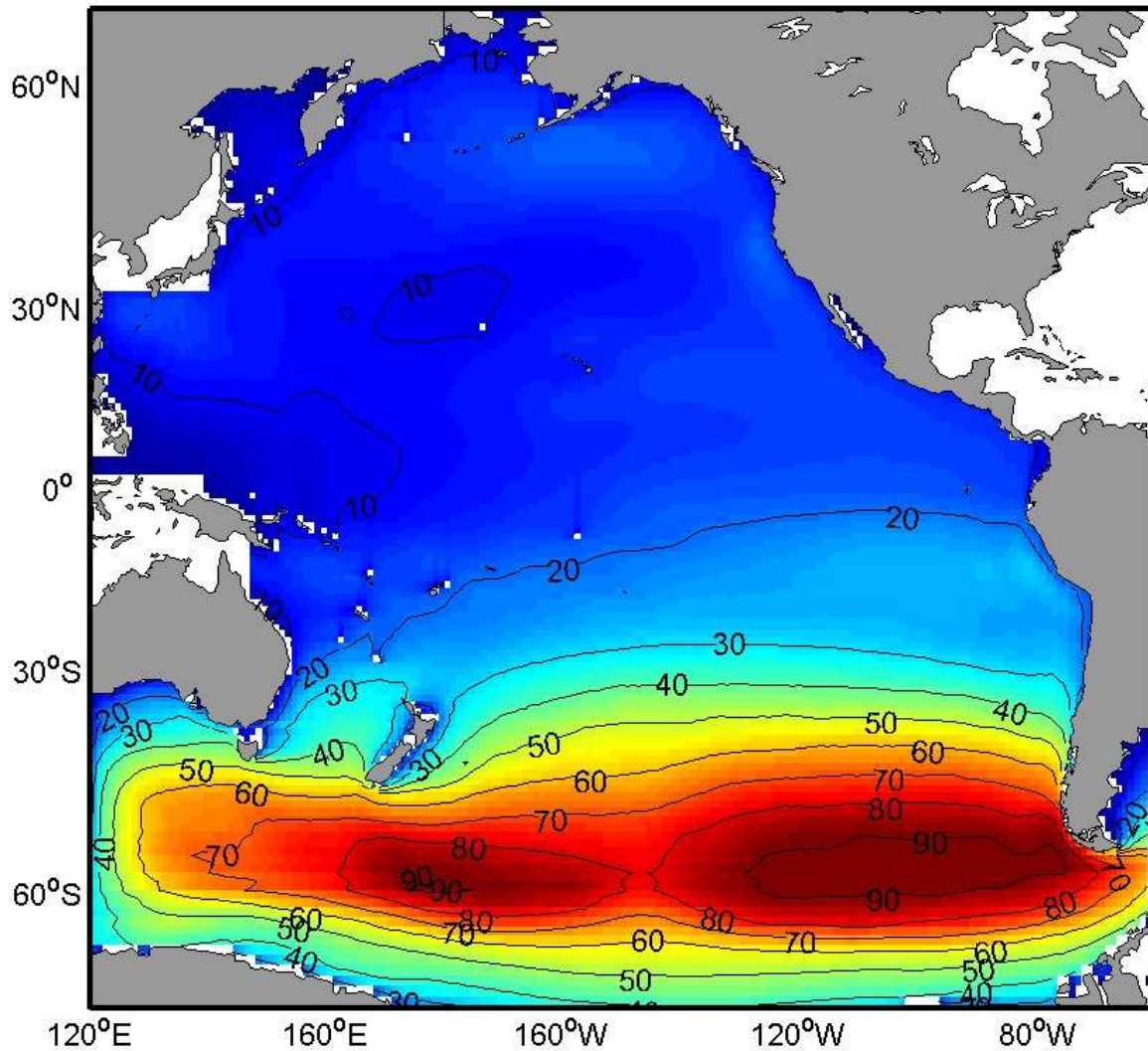


Figura 14. Promedio de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico estimado en kW/m para el mes de agosto en un período de 42 años.

Promedio Mensual: Septiembre PE-oleaje (kW/m)

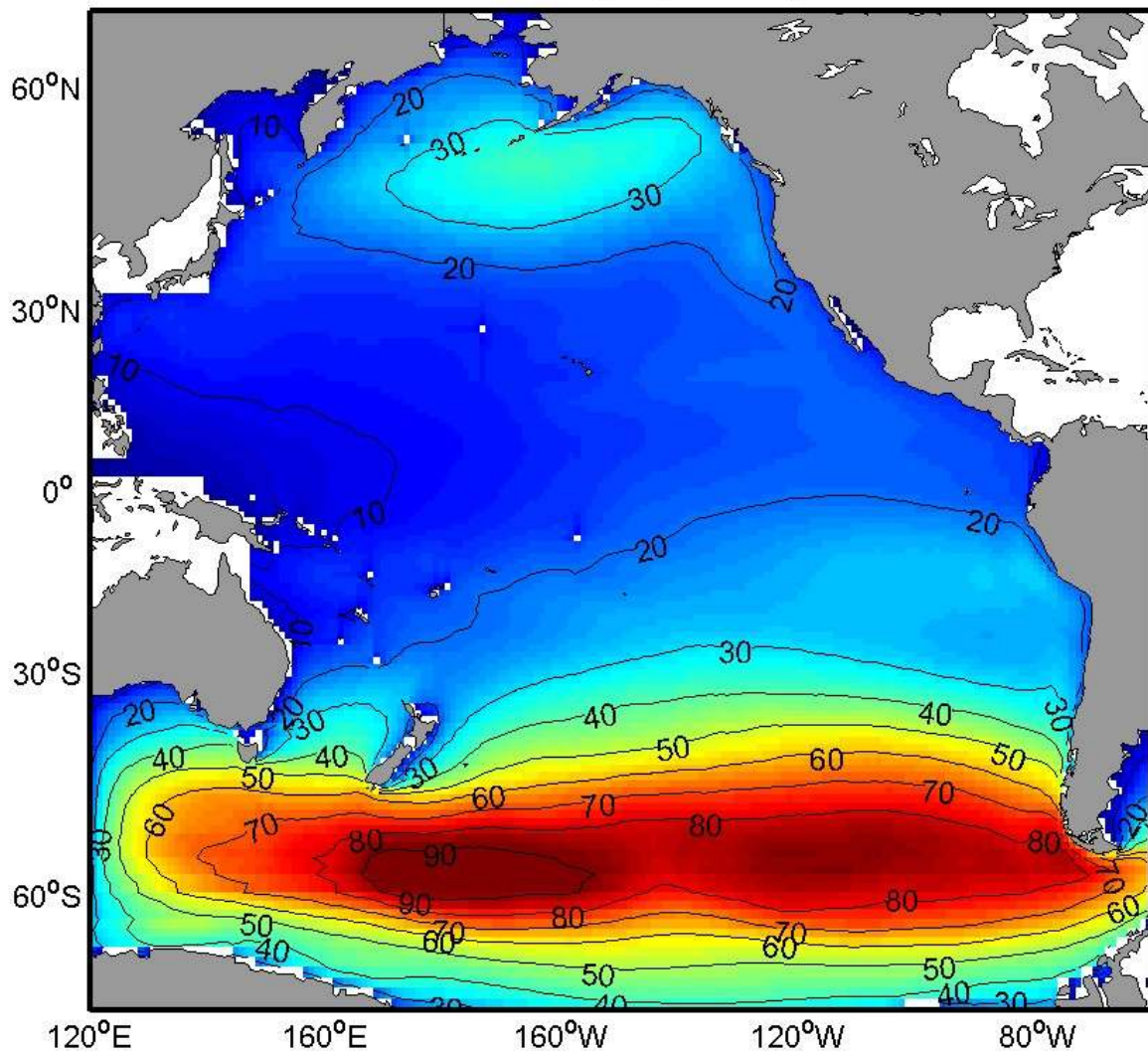


Figura 15. Promedio de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico estimado en kW/m para el mes de septiembre en un período de 42 años.

En las figuras 13,14 y 15, se observan los valores máximos de la potencia del oleaje (80-90 kW/m) en pleno invierno austral, contrastando con el hemisferio norte donde los valores ahora son mínimos (10-30 kW/m).

Promedio Mensual: Octubre PE-oleaje (kW/m)

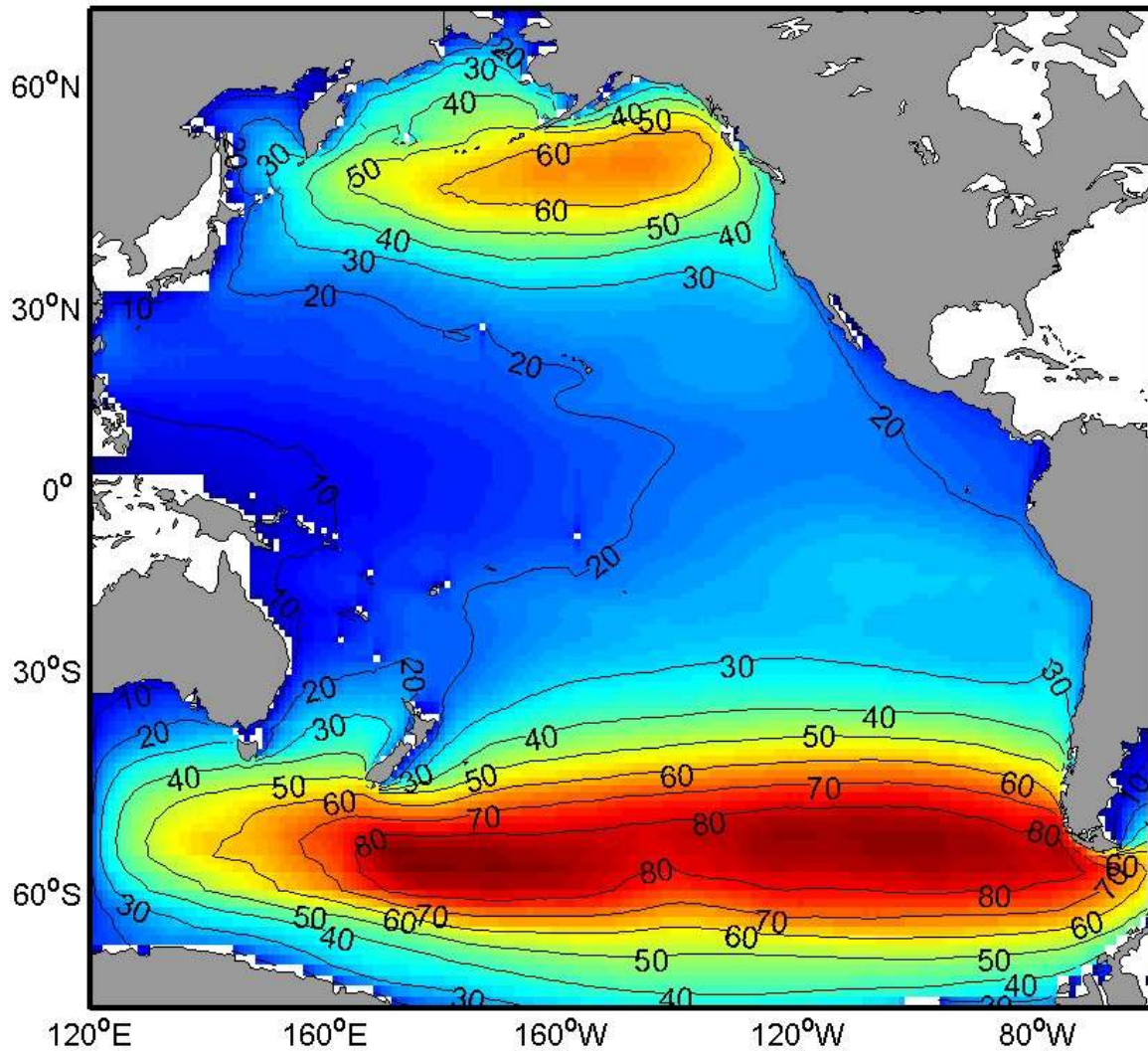


Figura 16. Promedio de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico estimado en kW/m para el mes de octubre en un período de 42 años.

Promedio Mensual: Noviembre PE-oleaje (kW/m)

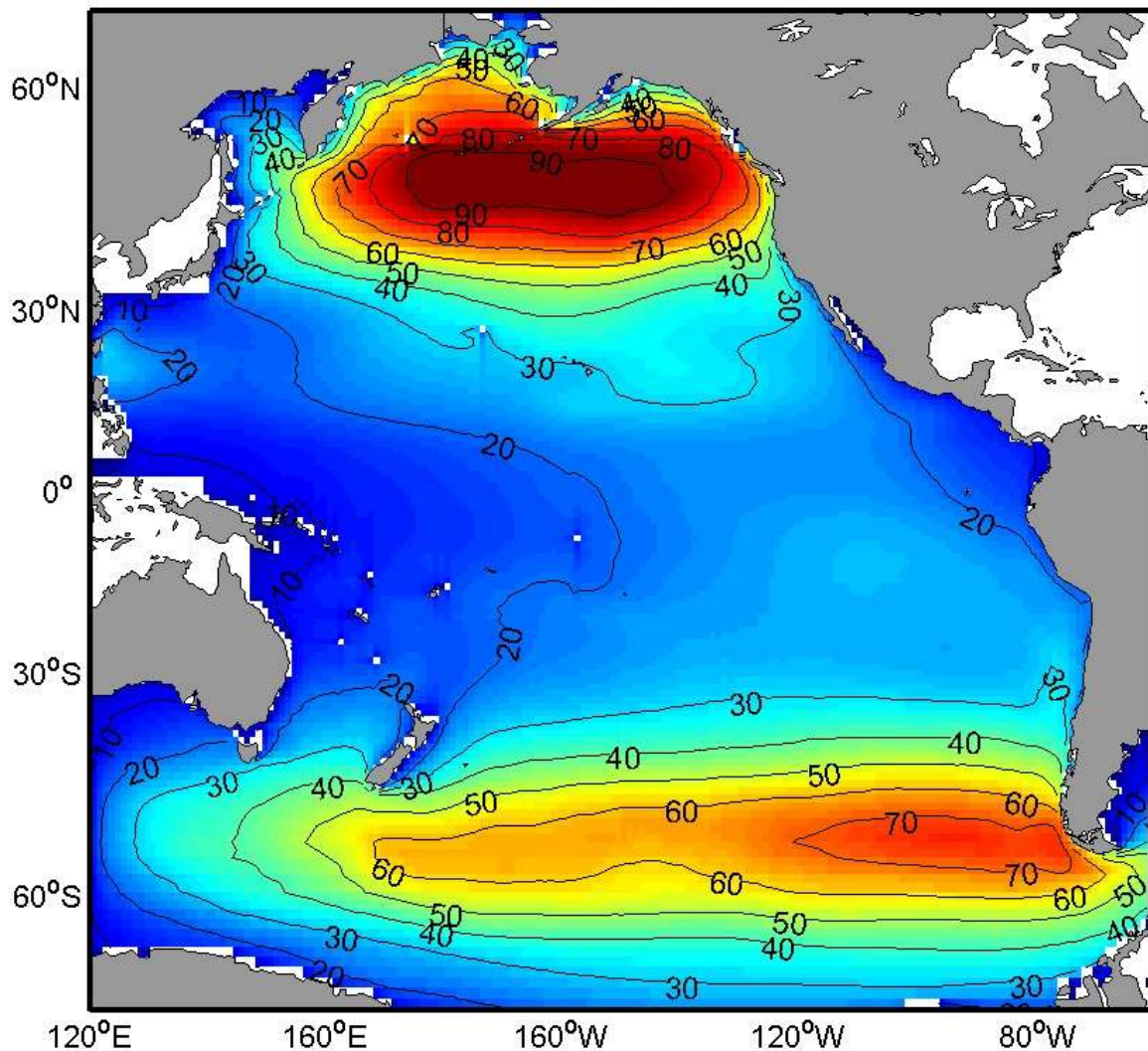


Figura 17. Promedio de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico estimado en kW/m para el mes de Noviembre en un período de 42 años.

Nótese en la figura 17 y 18 que a pesar de que el hemisferio sur se encuentra entrando a la temporada de verano, el nivel de la potencia del oleaje no disminuye drásticamente como hace el hemisferio norte, conservando valores de

50 a 70 kW/m, lo que nos indica que se siguen generando tormentas fuertes en esta región.

Promedio Mensual: Diciembre PE-oleaje (kW/m)

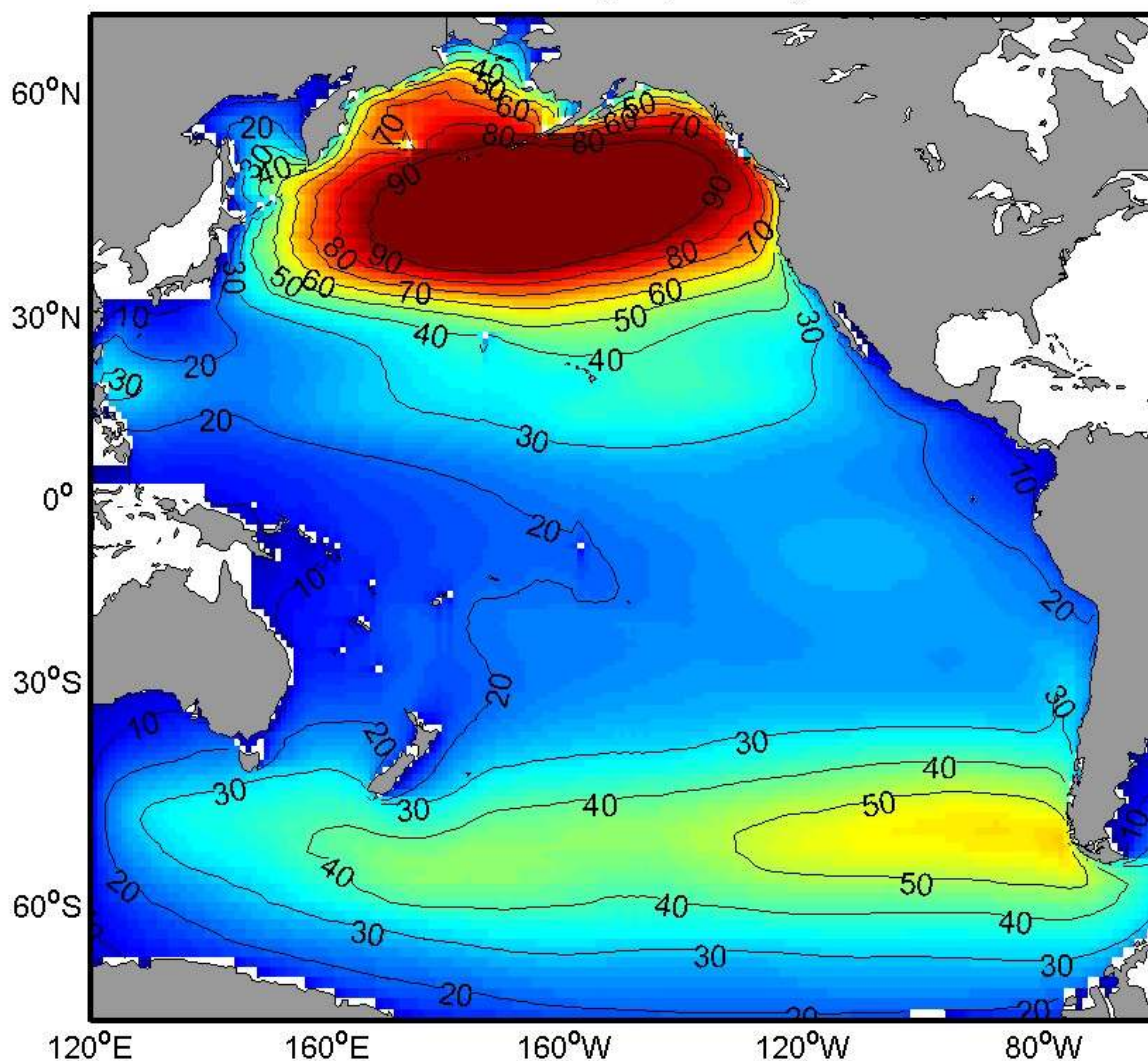


Figura 18. Promedio de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico estimado en kW/m para el mes de Diciembre en un período de 42 años.

En las figuras 16-18 podemos visualizar la entrada del invierno en el hemisferio norte, con fuertes tormentas generando oleaje altamente energético, registrando

valores de potencia del oleaje superiores a los 90 kW/m, mientras que en el hemisferio sur se presenta el verano, con un oleaje más débil a consecuencia de la disminución de la intensidad de las tormentas que se generan en esta zona.

4.2.2 Promedios estacionales de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico.

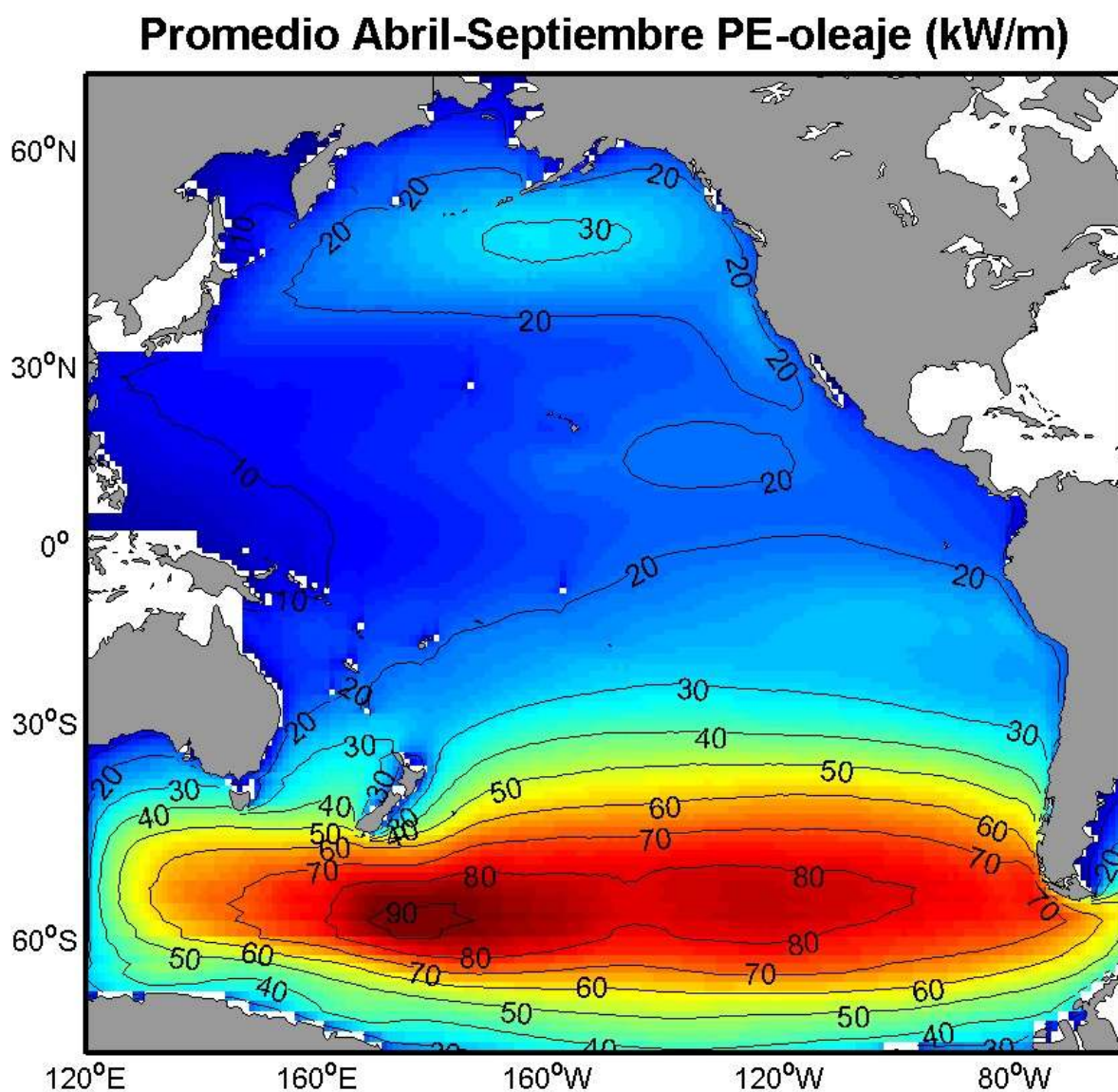


Figura 19. Promedio estacional de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico estimado en kW/m para el período abril-septiembre en una simulación de 42 años.

Promedio Octubre-Marzo PE-oleaje (kW/m)

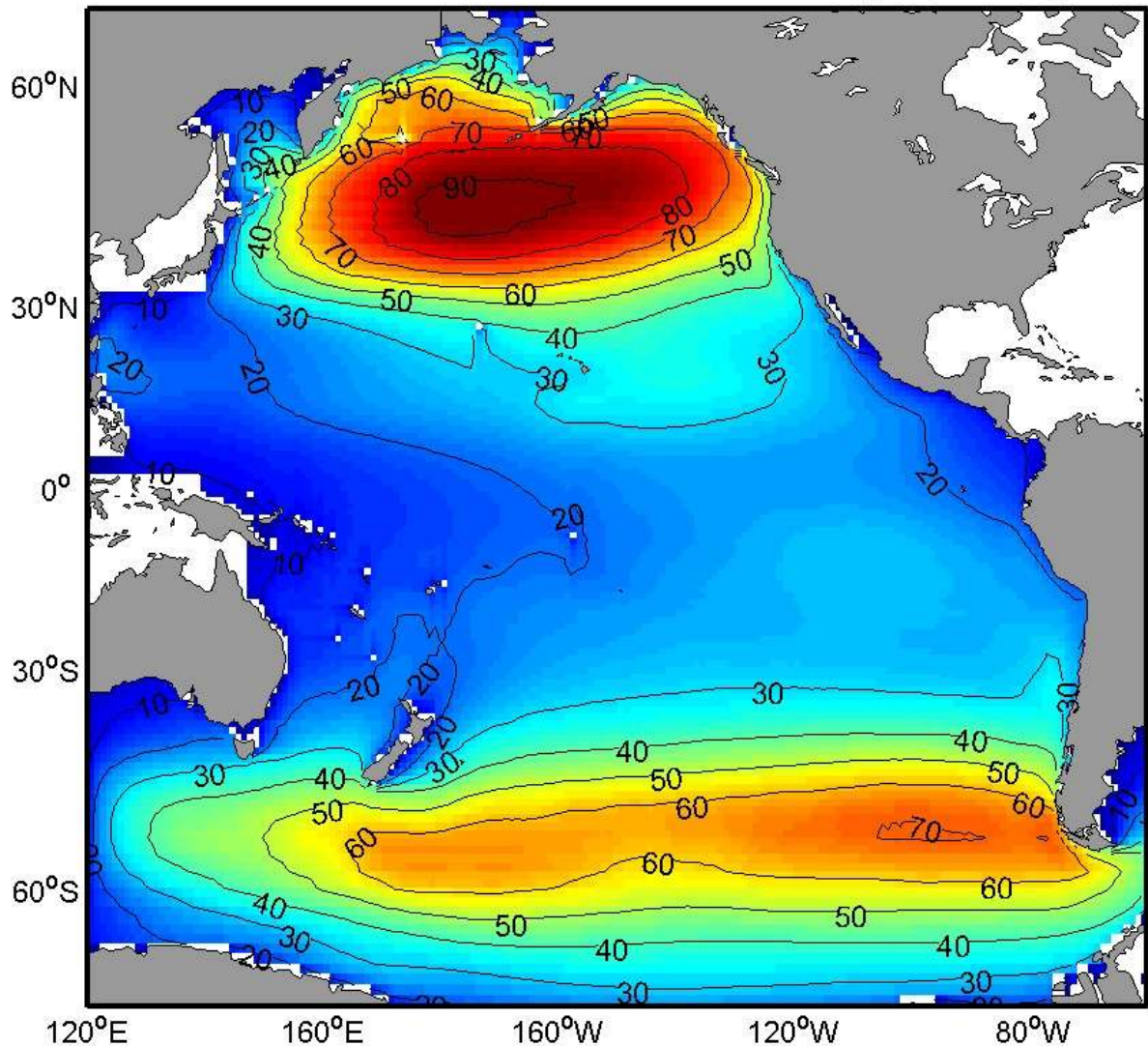


Figura 20. Promedio estacional de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico estimado en kW/m para el período octubre-marzo en 42 años.

La variación estacional puede ser claramente observada en las figuras 19 y 20, al tener valores máximos y mínimos de la potencia del oleaje en períodos semestrales que representan la temporada de tormentas en cada hemisferio.

Hágase notar que en el hemisferio sur el promedio de la potencia del oleaje no disminuye drásticamente en ninguno de los 2 períodos.

4.2.3 Promedio anual de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico.

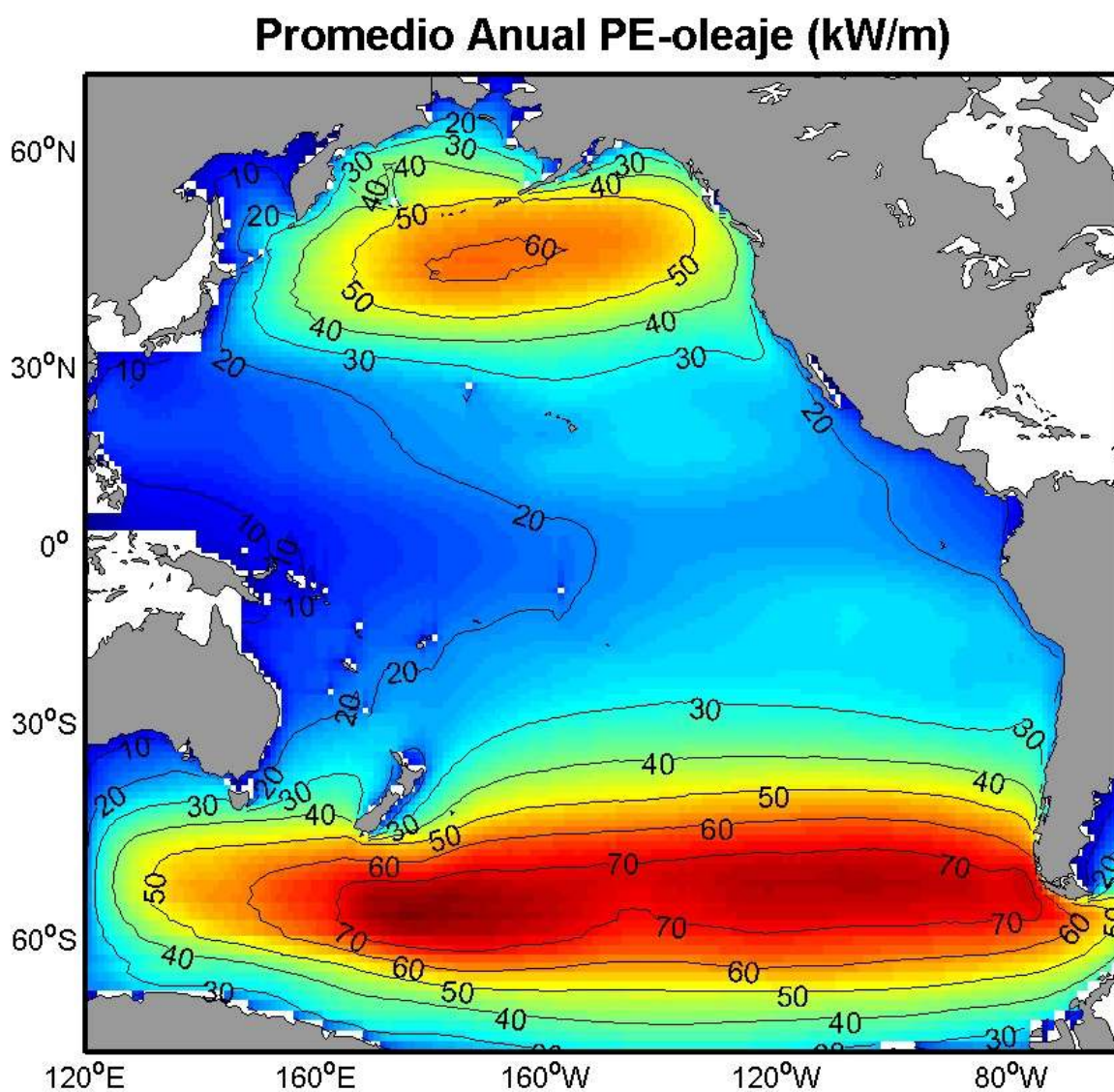


Figura 21. Promedio anual de la potencia del oleaje en el Océano Pacífico estimado en kW/m en un período de 42 años, las zonas en blanco representan áreas enmascaradas.

La figura 21 representa el promedio de la potencia del oleaje calculado en 42 años de simulación, en la que se puede observar la variación zonal de la potencia del oleaje, siendo las latitudes altas (40-60°) las zonas con mayor abundancia de este recurso.

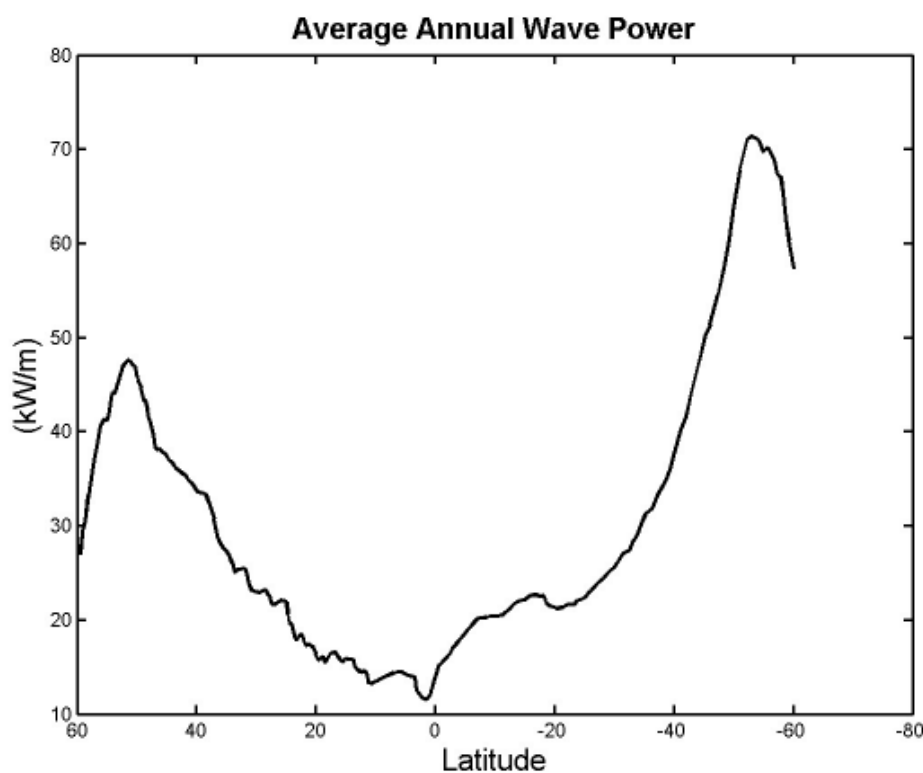


Figura 22. Gráfica de la variación de la potencia del oleaje cerca de la costa occidental del continente Americano.

La figura 22 representa el promedio total de la potencia del oleaje para la costa occidental, en la cual se tomó sólo el valor cercano a la costa, para conocer el valor promedio de la potencia en estas zonas, ya que es de interés para este estudio conocer dichos valores que puedan representar la costa mexicana.

Capítulo V.

5.1 DISCUSIONES.

5.1.1 Variación latitudinal de la potencia del oleaje.

Una de las características más notables de la distribución de la potencia del oleaje (ver figura(s) 19, 20 y 21) es la variación zonal, en la que se aprecian las condiciones más energéticas en latitudes más altas. Esto es más evidente en el hemisferio sur, donde se observan condiciones energéticas todo el año a diferencia del hemisferio norte, presentando su máximo en la temporada invernal (julio-septiembre). Esta misma situación se presenta en el hemisferio norte, con condiciones máximas en invierno (diciembre-febrero), y aunque los valores máximos son similares en los dos hemisferios, la variación estacional contrasta dramáticamente. Reportado también por Barsow *et al*, (2009).

Los valores máximos del potencial de energía del oleaje en el Pacífico sur se producen entre Nueva Zelanda y Chile, donde los valores son del rango de 90 kW/m durante agosto-septiembre (invierno). Los valores máximos en el Pacífico norte también son superiores a los 90 kW/m en los meses de diciembre y enero (invierno). Los valores para estas mismas zonas en condiciones de verano son del rango de 50 kW/m en el hemisferio sur, y 10 kW/m en el hemisferio norte. Por lo tanto, aunque los valores máximos son similares, la variabilidad estacional en el Pacífico norte es mayor que en el sur.

Young en 1999 afirmó que a menudo se suele suponer que las condiciones de alto oleaje en el sur del Océano Pacífico se producen como resultado de un *fetch*¹ extendido con vientos provenientes del oeste. Ésta es la única región del mundo donde no hay interrupción por tierra en dirección este-oeste. Y aunque un *fetch* largo juegue un papel significativo, la alta velocidad del viento y la duración en una tormenta es más importante en la generación máxima del oleaje (Young, 1999).

En contraste con latitudes altas, las zonas ecuatoriales ($\sim 0^\circ \pm 20^\circ$) están en calma prácticamente todo el año, con poca variabilidad estacional, con niveles de potencia del oleaje de entre 10 y 20 kW/m. Los mapas de la distribución de la potencia del oleaje muestran una disminución progresiva del mismo potencial de latitudes altas a la zona del Ecuador. Reportado también por Barstow *et al*, (2009) y Arinaga *et al*, (2011).

Mientras que en latitudes medias $\sim 20^\circ$ - 30° el potencial del oleaje muestra un aumento con respecto a latitudes bajas (ver figura 21), con niveles relativamente altos para estas zonas, probablemente es oleaje que se propaga fuera de la región de generación de tormentas en latitudes altas a estas latitudes medias. Cervantes 2009, demostró que el oleaje que es generado por tormentas largas en las costas de Chile y al sur y sureste de Nueva Zelanda, durante el verano austral arriba a las costas del Golfo de Tehuantepec en Oaxaca, México,

¹ *Fetch: término para designar un viento sostenido que sopla continuamente sobre un área

dándonos una clara idea de la distancia que puede viajar el oleaje altamente energético.

5.1.2 Variación longitudinal.

Los mapas de distribución de energía del oleaje muestran que la costa occidental del continente Americano, tiene un clima del oleaje más energético, que la costa oriental del Océano Pacífico, y es particularmente notorio en la costa occidental de América del Sur.

En las latitudes altas, el viento y la dirección del oleaje son provenientes del oeste. Por lo tanto la costa este presenta *fetchs* largos y por consiguiente mayores climas de oleaje. En adición, la velocidad del viento que viaja hacia el oeste de América del Sur aparece sistemáticamente superior que la del este (Young, 1999).

5.1.3 La validación del modelo numérico.

Después de obtener el coeficiente de correlación, se calculo y grafico la pendiente de la regresión lineal para cada comparación del modelo numérico con las boyas, dando como resultado pendientes negativas, lo que indica una tendencia a subestimar las alturas mayores de olas y a sobreestimar las alturas menores.

Aunque la mayor ocurrencia de las alturas de las olas oscila entre 1 y 3 m, donde la relación de las alturas H_s de la boya y la H_s del modelo es de $R \approx 1$, de

modo que el modelo aproxima correctamente las H_s de ola con mayor ocurrencia, durante la simulación realizada.

El análisis de la boya 46053 muestra un valor de correlación $R=0.6353$, siendo este valor el más bajo obtenido de las 9 boyas, mientras que la boya 46006 indico el valor más alto registrando una correlación $R=0.85091$.

El valor más bajo proporcionado por la boya 46053 probablemente se debe a que la posición de la boya se encuentra al suroeste de Santa Mónica, California en USA, justo detrás de las islas Santa Rosa, Santa Cruz y San Miguel, donde el oleaje es alterado por efectos de sombra que producen estas islas, propiciando un cambio en la dirección y altura de las olas que arriban a esta región; en cambio el modelo numérico simula que el oleaje en esa zona se propaga libremente sin ningún obstáculo.

Mientras que la boya 46006 está localizada en aguas profundas, sin obstáculo alguno que modifique las propiedades del oleaje, es por ello que obtuvo un valor más alto en la prueba de concordancia.

La validación del modelo numérico solo se realizó con 9 boyas de la NDBC en el norte del Océano Pacífico por dos motivos principalmente: el primero es que de todo el arreglo de boyas de la NDBC en el Océano Pacífico, solo estas 9 boyas tienen registro de datos de altura y periodo de ola, además de una serie de tiempo larga. La segunda razón es porque boyas que contienen información de altura y periodo de ola, pertenecientes a instituciones académicas o gobiernos de distintos países, requieren de un pago por esta información.

5.1.4 Cálculos de la potencia del oleaje.

En la figura 17 se puede observar la potencia del oleaje promedio para un año típico, pero este no representa el valor acumulado de un año promediado en 42 años de simulación, sino más bien representa el promedio de los 42 años o lo que es lo mismo ~15335 días de simulación, en realidad es el valor promedio que podríamos tener cualquier día en un año típico.

En todas las figuras de distribución de potencia del oleaje muestran espacios en blanco, es decir sin ningún valor asociado a esa región, esto es debido a que dentro de la simulación estos espacios generaban errores numéricos, ya que el modelo matemático no puede simular el oleaje en estas regiones, por lo que se decidió enmascarar estas áreas haciéndolas pasar como tierra firme.

La simulación numérica trabajo siempre en el dominio de aguas profundas, es decir que cerca de la costa también se considero como aguas profundas, la batimetría que se utiliza para la simulación solo funciona para delimitar el área entre el agua y tierra.

5.1.5 Potencial Energético del oleaje cercano a la costa.

Para realizar los cálculos abajo descritos, se tomo el valor de potencia del oleaje aproximadamente a 200 km de la costa, donde el oleaje aun está dominado por las aguas profundas, teniendo la certeza de que los valores obtenidos son aproximados a los observados (ver figura 22).

Baja California cuenta con 880 km de litoral del lado del Océano Pacífico, donde se registran valores de potencia del oleaje de 20 a 30 kW/m por frente de ola, en un promedio anual. Para obtener un valor aproximado de la potencia del oleaje en esta zona se realizaron cálculos en los que se obtuvo que en una distancia lineal de 1 km se pudieran obtener 30000 kW o bien 10800 MWh, haciendo la suposición de que un dispositivo de extracción de energía tenga una eficiencia del 100%.

De modo que si el consumo per-cápita de electricidad en México 2008 (INEGI) es de 2.020 kWh, tendríamos que 1 km lineal de oleaje podría suministrar energía eléctrica a ~5346 usuarios, sin embargo, en la práctica sólo una fracción de la potencia del oleaje podría ser extraída por algún dispositivo, ya que dependen en gran medida de la intensidad de las olas, la gran variabilidad de las mismas, ya sea diaria, mensual o estacional. Por lo que necesitaríamos grandes extensiones de mar abierto para colocar complejos de extracción de energía del oleaje para cubrir las necesidades eléctricas de una comunidad o ciudad.

Con estos cálculos se pretende mostrar que si bien la extracción de la energía del oleaje no es de gran magnitud, podría llegar a realizar un aporte importante de energía eléctrica y que combinado con otras fuentes alternativas de energía renovable se podría contribuir en gran parte al consumo actual de energía en México.

5.1.6 Comparación de resultados.

Como ya se comento anteriormente el presente trabajo fue realizado a partir de los resultados obtenidos del modelo WAM ciclo 4.5 aplicado a la región del Océano Pacífico, mientras que otros autores como Barstow *et al*, en 2009 trabajaron con WAM y Arinaga *et al*, en 2011 trabajaron con WAVEWACH III, siendo estos 3 modelos numéricos de los denominados 3era generación aunque cada uno de ellos esta formulado de forma independiente y diferente.

Se trabajo en una simulación histórica de 42 años a una resolución espacial regular de un 1° , a diferencia de Barstow *et al*, 2009 quienes realizaron una simulación de los últimos 10 años a una resolución de 0.5° , y Arinaga *et al*, en 2011 trabajaron en una malla de $1.25^\circ \times 1^\circ$ en una simulación de los últimos 10 años.

El presente trabajo y Barstow *et al*, 2009 comparten la formula de la potencia del oleaje (ver ecuación 2.4), mientras que Arinaga *et al*, 2011 trabaja con la altura cuadrática media H_{rms}^2 .

Aunque el presente trabajo y los citados anteriormente han sido desarrollados de forma independiente, y trabajado con modelos y escalas distintas, los resultados aparecen sistemáticamente similares, mostrando concordancias en la distribución de la potencia del oleaje y en ocasiones en los valores de la potencia. El desarrollo de la energía de las olas requiere de un conocimiento general del clima de las olas y estimaciones fiables de la potencia del oleaje. El presente trabajo viene a confirmar y aportar nuevo conocimiento

mediante una metodología, un modelo numérico diferente y un tiempo de simulación histórico.

5.2 CONCLUSIONES.

Mediante un conjunto de datos de oleaje obtenidos a través de una simulación histórica de 42 años del modelo numérico WAM ciclo 4.5 aplicado a la región del Océano Pacífico como parte de las actividades del programa CONACYT-CENER S0019-2009-01, se elaboró la climatología de la potencia disponible del oleaje en el Océano Pacífico.

La validación del modelo numérico indica que las alturas de ola menores a 1 m son sobreestimadas y las alturas mayores a 4 m son subestimadas por la simulación del modelo numérico con respecto a las *Hs* medidas *in situ* por 9 boyas de la NDBC-NOAA, simulando correctamente las olas de mayor ocurrencia (entre 1 y 3m).

La cobertura espacial y temporal ha permitido una climatología de la potencia del oleaje en todo el Océano Pacífico. Esta climatología muestra la variabilidad estacional en una resolución espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$.

Los mapas de distribución de energía del oleaje muestran claramente que la mayor riqueza energética por área en el Océano Pacífico se encuentra de latitudes medias a altas, en ambos hemisferios, es decir entre los $\pm 60^{\circ}$ y $\pm 30^{\circ}$, disminuyendo progresivamente mientras se reduce la distancia hacia el Ecuador.

La región con mayor riqueza energética del oleaje se encuentra en el hemisferio sur, donde la variación estacional es menor que en el hemisferio norte.

El potencial energético del oleaje es vasto y puede ser explotado en varias regiones del Océano Pacífico, países con largas líneas costeras son favorecidas con este recurso, en especial, costas ubicadas en altas y/o medias latitudes. La costa de Chile es altamente beneficiada con la potencia del oleaje prácticamente todo el año, mientras que la costa Oeste de Estados Unidos, Alaska, Canadá y México son beneficiadas únicamente durante la temporada invernal, por mencionar algunas.

Capítulo VI.

6.1 REFERENCIAS:

Ardhuin, F., Charon, B., and Collard, F. 2009. Observation Of Swell Dissipation Across Oceans. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L06607

Arinaga, R., Cheung, K., 2011. Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data. *Renewable Energy*, Vol. 39, No. 1. (March 2012 in press), pp. 49-64

Barstow, S., Mork, G., Lonseth, L., and Mathisen, J. 2009. Worldwaves Wave Energy Resource Assessments From The Deep Ocean To The Coast. Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden.

Brekken, K. A., Jouanne, A., Han, H. 2008. Ocean Wave Energy Overview And Research At Oregon State University. Oregon State University.

Brooke, J. 2003. Wave Energy Conversion. Elsevier Ocean Engineering Book Series. Volume 6. 187 pp.

Cavia-del-Olmo, B. 2009. Explotación Del Potencial De Energía Del Oleaje En Función Del Rango De Trabajo De Prototipos Captadores. Universidad Politécnica de Catalunya. Minos Thesis. 130 pp.

Cervantes-Audelo, I. G. 2009. Variabilidad Del Oleaje De Período Largo En El Golfo De Tehuantepec. Tesis de licenciatura. Universidad del Mar. 66 pp.

Cruz, J. 2008. Ocean Wave Energy. Current Status and Future Perspectives. Springer. 431 pp.

Cerca-Martínez, L. M. 1995. Evaluación Del Potencial De Extracción De Energía Eléctrica Del Oleaje, Como Posible Fuente Alterna En Rosarito, B.C. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. UABC. 51 pp.

Duarte-Quiroga, P. (2004). "Evaluación De La Energía Del Oleaje Para Islas Del Pacífico Mexicano. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. UABC. 142 pp.

Günther, H., Hasselmann, S. and Janssen, P. 1992. Report No. 4. The Wam Model Cycle 4. Modellberatungsgruppe.

Hidalgo-Olea, L. (2009). Análisis del potencial energético del oleaje. Aplicación a la isla de Lanzarote. Universidad Politécnica de Catalunya. Minos Thesis. 117 pp.

Holthuijsen, L. H. 2007. Waves In Oceanic And Coastal Waters. Cambridge University Press. 387 pp.

Komen, G. J., Calaveri, I., M. Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselman, S., and Janssen, P.A.E.M. 1994. Dynamics And Modelling Of Ocean Waves. Cambridge Univ. Press, 532 pp.

McCormick, M. E. (1981). Ocean Wave Energy Conversion. Wiley-Interscience: 233 pp.

Open University course team. 1989. Waves, Tides And Shallow-Water Processes. The Open University. 227 pp.

Panicker, N.N., 1976. Power Resource Potential of Ocean Surface Waves, Proceeding of Wave and Salinity Gradient Workshop, Newark, Delaware, USA, pp. J1–J48.

Schoolderman, J. E. 2009. Generating Electricity From Waves At A Brackwater In A Moderate Wave Climate. Delft University of Technology. 223 pp.

Thorpe, T.W., 2004 WORLD ENERGY COUNCIL. SURVEY OF ENERGY RESOURCES. Elsevier. 464 pp.

Tolman, H. L. 2009. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. . NOAA/NWS/NCEP/MMAB Tech. Rep. : 276, 220 pp.

Young, I.R. 1999. Seasonal Variability Of The Global Ocean Wind And Wave Climate. International Journal of Climatology. 19: 931-950.

Referencias Electrónicas.

Banco Mundial.

http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC?cid=GPDes_28

Comisión Federal de Electricidad.

<http://www.cfe.gob.mx/Paginas/Home.aspx> Consultado el 14-sep-2011.

Gobierno del Estado de Baja California.

http://www.bajacalifornia.gob.mx/energia/doctos/tu_energia_descripcion.pdf

Consultado el 14-sep-2011.

Index Mundi.

http://www.indexmundi.com/es/mexico/electricidad_consumo.html

International Energy Agency (2008).

<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/key2006.pdf> Consultado el 19-jul-2011 pp. 50–57

National Data Bouy Center.

<http://www.ndbc.noaa.gov/obs.shtml>

The World Factbook.

<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>